

11;12

## Измерение параметров диэлектрических слоев методом периодической зарядки их поверхности

© П.Ю. Жилинскас, Э. Монтримас, Т. Лозовски

Вильнюсский университет,  
10222 Вильнюс, Литва  
e-mail: pranas.zilinskas@ff.vu.lt

(Поступило в Редакцию 18 октября 2005 г.)

На основе периодического дозированного осаждения заряда на поверхность диэлектрического слоя, синхронного измерения накопленного заряда и поверхностного потенциала, а также измерения поверхностного потенциала, как при произвольной разрядке, так и при разрядке под действием освещения слоя, показана возможность определения параметров и характеристик исследуемого диэлектрического слоя. По накопленным во время измерения данным строится зависимость величины поверхностного потенциала слоя от величины плотности осаждаемого заряда, а также зависимости эффективной емкости, дифференциальной емкости и сопротивления утечки слоя от величины поверхностного потенциала. Показано, что по полученным характеристикам можно анализировать физические явления, происходящие в исследуемом диэлектрическом слое, определить временные параметры, т.е. время полуспада потенциала в темноте и время полуспада потенциала при освещении слоя, а также определить емкость, предельное значение поверхностного потенциала, рассчитать диэлектрическую проницаемость, сопротивление утечки и фоточувствительность исследуемого диэлектрического слоя.

PACS: 77.20.-d

### Введение

Диэлектрические материалы чаще всего применяются в виде слоев или пленок. Они находят применение в электротехнической и электронной промышленности, где используются в качестве изолирующих пленок, в микроэлектронике — как разделяющие среды между проводящими слоями, в копировальных устройствах — как носители записи и размножения оптической информации и т.д.

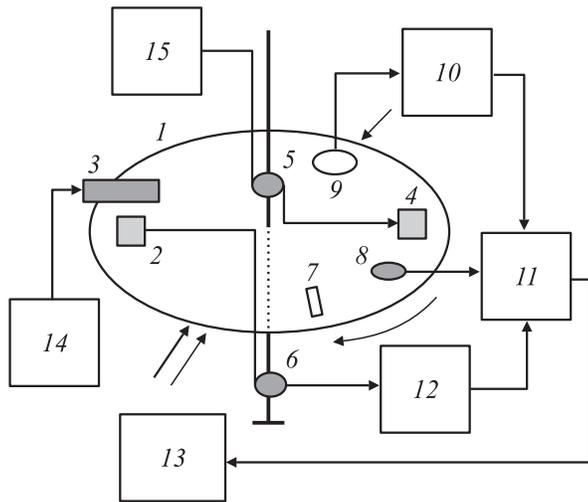
В одних случаях диэлектрические слои должны удерживать накопленный электрический заряд, в других — наоборот, должны быстро разряжаться в темноте или под действием освещения. В зависимости от области применения требования к техническим параметрам и характеристикам могут быть различными. Обычно диэлектрические материалы характеризуются диэлектрической проницаемостью. Кроме того, диэлектрические слои и пленки характеризуются электрической емкостью, критической напряженностью электрического поля, предельным электрическим напряжением или напряжением пробоя, током и сопротивлением утечки, тангенсом угла диэлектрических потерь и др. Фоточувствительные диэлектрические слои и пленки характеризуются скоростью разряда под действием освещения, остаточным поверхностным потенциалом и т.д. [1].

Чаще всего измерения электрических параметров и характеристик диэлектрических материалов осуществляется путем создания конденсатора из слоев или пленок этих материалов [2,3]. В этом случае с обеих сторон исследуемого слоя или пленки формируются электроды напылением проводящего слоя либо их сжатием между двумя металлическими пластинами. После этого

измеряются электрические параметры под воздействием электрических импульсов или гармонических колебаний. К недостаткам этого метода можно отнести невозможность проведения измерений при некоторых внешних воздействиях, например, освещении слоя, под атмосферным воздействием, а также то, что при нанесении электродов разрушается исследуемый слой. В некоторых случаях более подходящим способом измерения электрических и фотоэлектрических параметров диэлектрических слоев является бесконтактный способ, когда под воздействием потока зарядов осуществляется одновременное измерение переходных процессов накопления заряда на поверхности исследуемого диэлектрического слоя и поверхностного потенциала этого слоя. Такое измерение можно осуществить путем периодического и дозированного осаждения заряда на поверхность слоя и синхронного измерения накопленного заряда и потенциала, который создается этим зарядом [4,5].

### Структурная схема устройства

Устройство, осуществляющее измерения электрических параметров и характеристик диэлектрических и фотодиэлектрических слоев и пленок при помощи периодического дозированного осаждения заряда, показано на рис. 1. Оно состоит из механической системы, выполненной, например, в виде диска, на котором помещены исследуемый и металлический слои, а также из генератора ионов, осуществляющего зарядку слоя, преобразователя заряда, преобразователя поверхностного потенциала и источника калиброванного напряжения, подключенного через коллекторный контакт к металлическому слою,



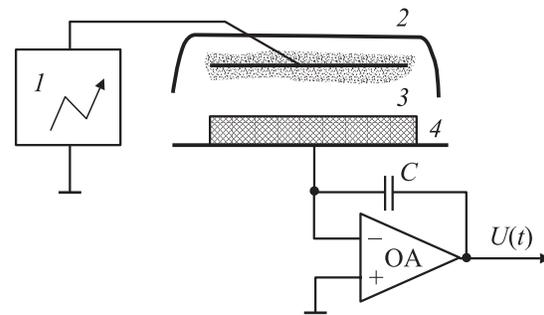
**Рис. 1.** Схема устройства измерения параметров диэлектрических слоев: 1 — вращающийся диск, 2 — исследуемый слой, 3 — генератор ионов, 4 — металлический слой, 5, 6 — коллекторные контакты, 7 — синхронизатор, 8 — датчик синхронизации, 9 — зонд преобразователя поверхностного потенциала, 10 — преобразователь поверхностного потенциала, 11 — компьютерная система с аналого-цифровым преобразователем, 12 — преобразователь (накопитель) заряда, 13 — источник освещения, 14 — источник высокого напряжения, 15 — источник калиброванного напряжения.

который используется в качестве эквивалента исследуемого слоя для калибровки процесса измерения поверхностного потенциала. Все преобразованные величины в виде напряжений передаются компьютерной системе, которая содержит аналого-цифровой преобразователь. В устройстве установлен источник освещения слоя, используемый для фотозарядки исследуемых фоточувствительных слоев. Синхронизация работы измерительной системы, время и длительность экспозиции слоя управляются компьютером.

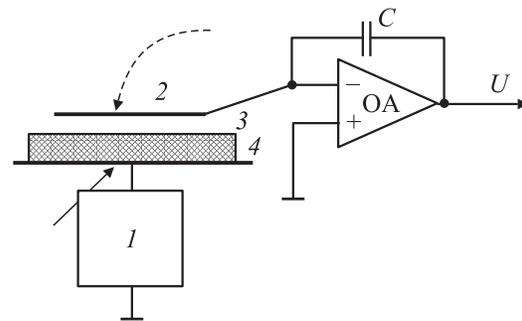
Периодическая дозированная зарядка исследуемого слоя осуществляется за счет вращения диска с постоянной угловой скоростью. Доза осажденного заряда на исследуемый слой за один период вращения диска определяется угловой скоростью вращения диска и интенсивностью генерации ионов. Когда слой находится под воздействием генератора ионов, измеряется накапливаемый слоем заряд, после чего исследуемый слой перемещается к электроду преобразователя поверхностного потенциала, и измеряется поверхностный потенциал. Тем же преобразователем поверхностного потенциала измеряется поверхностный потенциал металлического слоя. Накопленные в компьютере данные обрабатываются, и по ним рассчитывается накопленный заряд в слое и потенциал на поверхности слоя. По данным можно рассчитать, например, вольт-кулоновые и вольт-фарадные характеристики, на основе которых можно судить о процессах экстракции и инжекции носителей тока в исследуемых слоях.

Измерение количества заряда, осаждаемого на диэлектрическом слое, осуществляется во время воздействия слоя потоком ионов, создаваемых генератором ионов. Генератор ионов состоит из источника высокого напряжения и системы электродов, между которыми возникает коронный разряд за счет ионизации молекул воздуха. В зависимости от знака напряжения, приложенного к электроду генератора ионов, по направлению к поверхности слоя создается поток положительных либо отрицательных ионов. Определение количества заряда, накопленного диэлектрическим слоем, осуществляется при помощи преобразователя заряда, подключенного к подложке исследуемого слоя (рис. 2).

В качестве преобразователя заряда используется операционный усилитель (ОА) с высоким входным сопротивлением (более  $10^{12} \Omega$ ) и конденсатором  $C$  в цепи отрицательной обратной связи. На выходе ОА появляется напряжение  $U(t)$ , пропорциональное накопленному заряду  $Q(t)$ , т.е.  $U(t) = kQ(t)$ , где  $k = 1/C$ ,  $C$  — емкость конденсатора. Конденсатор — высококачественный, калиброванный емкости и с малым током утечки (менее  $10^{-14} \text{ А}$ ). Напряжение с выхода преобразователя заряда поступает в компьютерную систему, в которой рассчитывается значение измеренного количества на-



**Рис. 2.** Схема измерения заряда, накопленного диэлектрическим слоем: 1 — источник высокого напряжения, 2 — генератор ионов, 3 — диэлектрический слой, 4 — подложка,  $C$  — конденсатор, ОА — операционный усилитель.



**Рис. 3.** Измерение поверхностного потенциала диэлектрического слоя: 1 — источник регулируемого напряжения, 2 — измерительный зонд, 3 — диэлектрический слой, 4 — подложка,  $C$  — конденсатор, ОА — операционный усилитель.

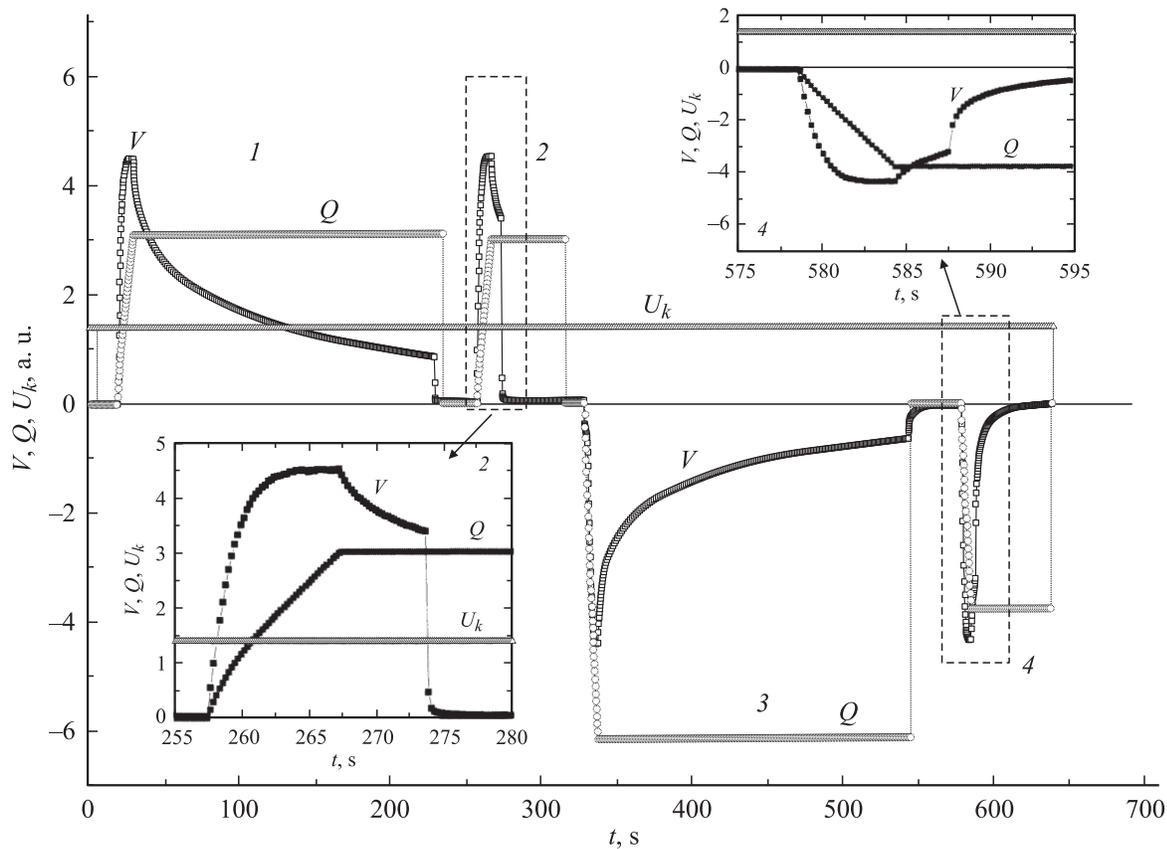


Рис. 4. Типичная диаграмма последовательности измерения.

копленного заряда. Исходное состояние преобразователя заряда устанавливается путем замыкания выводов конденсатора  $C$ .

Измерение абсолютного значения поверхностного потенциала исследуемого слоя осуществляется при помощи преобразователя (рис. 3), в котором используется преобразователь заряда с измерительным зондом, приближаемым на фиксированное расстояние к поверхности слоя. Значение поверхностного потенциала определяется либо компенсационным способом, либо методом сравнения. При последнем измерительный зонд за счет вращения диска поочередно перемещается от поверхности диэлектрического слоя к поверхности металлического проводящего слоя, подключенного к калиброванному источнику напряженности. В этом случае для достижения необходимой точности измерения следует выдержать одинаковое расстояние между измерительным зондом и исследуемым слоем и между измерительным зондом и металлическим проводящим слоем, подключенным к источнику калиброванного напряжения. Напряжение с выхода преобразователя потенциала поступает в компьютерную систему, в которой рассчитывается значение измеренного поверхностного потенциала. После каждого измерения исходное состояние преобразователя потенциала устанавливается путем замыкания выводов конденсатора  $C$ , подключенного между входом и выходом ОА.

### Диаграмма последовательности процесса измерения

На рис. 4 представлена типичная диаграмма последовательности процесса измерения поверхностного потенциала  $V$ , количества накопленного заряда  $Q$  и калибровочного напряжения  $U_k$  исследуемого диэлектрического фоточувствительного слоя. Весь процесс измерения разделен на четыре этапа. Сначала исследуемый слой заряжается положительным, 1 и 2 этапы, а затем отрицательным — 3 и 4 этапы, зарядом.

На этапе 1 после дозированной зарядки слоя положительным зарядом создаются условия для самопроизвольной разрядки в темноте, на 2 после дозированной зарядки слоя положительным потенциалом при самопроизвольной разрядке в темноте слой облучается красным светом, который вызывает быструю разрядку слоя (на рис. 4 показано в увеличенном виде). На этапе 3 после дозированной зарядки слоя отрицательным потенциалом создаются условия для самопроизвольного разряжения в темноте, 4 — после дозированной зарядки слоя отрицательным потенциалом при самопроизвольной разрядке в темноте слой облучается красным светом (показано в увеличенном виде), что вызывает быструю разрядку слоя.

Процесс зарядки слоя может длиться от нескольких миллисекунд до нескольких десятков секунд, и для

разных исследуемых слоев эти значения могут быть различными. Процесс темновой разрядки слоя, в зависимости от исследуемого материала, может длиться от нескольких секунд до десятков часов, а спад потенциала при разрядке под внешним воздействием, например, при освещении слоя, в зависимости от интенсивности облучения, может длиться от долей микросекунд до нескольких сотен секунд.

На основе этих результатов, которые накапливаются в памяти компьютера, можно определять параметры и характеристики исследуемого диэлектрического слоя, а также изучать происходящие физические процессы.

## Определение характеристик и параметров диэлектрических слоев

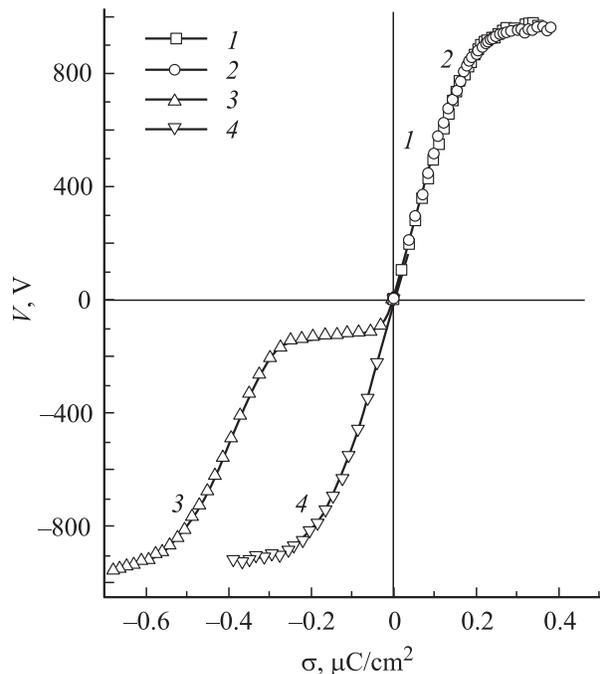
Для подробного разъяснения процесса определения параметров диэлектрических слоев методом периодической дозированной зарядки их поверхности далее рассматривается, как на основе накопленных данных измерения поверхностного потенциала, количества заряда и калибровочного напряжения типичного диэлектрического слоя (рис. 4) можно построить: вольт-кулоновые (ВКХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики, зависимости сопротивления утечки диэлектрического слоя от поверхностного потенциала. Также рассматривается, как на основе этих характеристик можно определить предельное значение поверхностного потенциала слоя и фоточувствительность слоя.

### Вольт-кулоновые характеристики

Зависимость поверхностного потенциала от накопленного заряда ВКХ в идеальном диэлектрическом слое должна быть прямолинейной. Однако в реальных слоях она отличается от прямолинейной зависимости. Изучение причин появления нелинейности ВКХ является задачей исследования диэлектрических слоев. Для построения ВКХ диэлектрического слоя следует осуществить периодическую дозированную зарядку слоя как положительными, так и отрицательными зарядами, и для каждого значения накопленного заряда определить значение поверхностного потенциала. По полученным зависимостям можно судить о происходящих процессах инжекции, экстракции и генерации носителей заряда в исследуемом слое [6].

На рис. 5 представлены ВКХ, т.е. зависимость потенциала поверхности слоя  $V$  от плотности заряда  $\sigma$  для всех четырех этапов по данным, представленным на рис. 4.

По этим характеристикам видно, что прямолинейность сохраняется только в интервале напряжений от +800 до -700 В (см. рис. 5, зависимости 1, 2 и 4). Прямолинейность ВКХ показывает, что в этом диапазоне потенциалов не происходят явления инжекции или экстракции носителей тока. Во время периодической дозированной зарядки заряд накапливается на поверхности слоя и заряжается емкость слоя. Также по этим характеристикам видно, что при дальнейшей дозированной



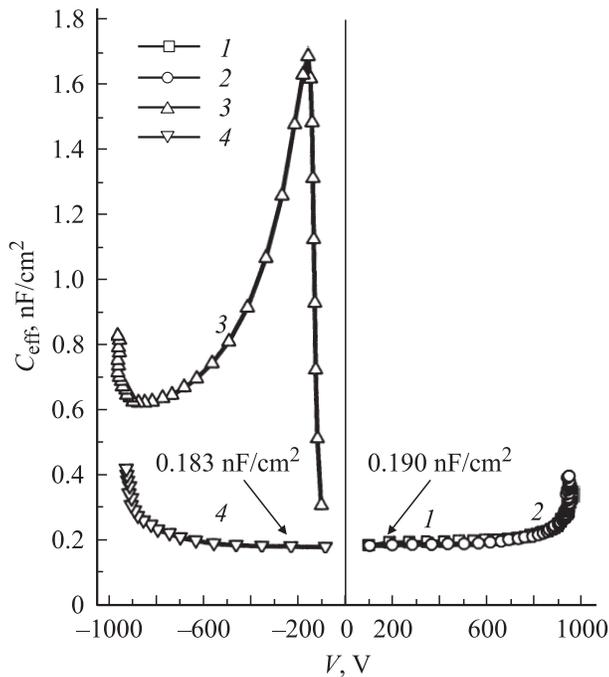
**Рис. 5.** Зависимость величины поверхностного потенциала  $V$  слоя от величины плотности осаждаемого заряда  $\sigma$ . Значения 1–4 те же, что на рис. 4.

зарядке слоя прекращается повышение как положительного, так и отрицательного поверхностного потенциала, что свидетельствует о росте тока через диэлектрический слой. На рис. 5 приведена кривая 3, полученная при дозированной зарядке диэлектрического слоя во время этапа 3, т.е. при зарядке слоя отрицательными зарядами (рис. 4). Эта кривая показывает, что сначала осуществляется экстракция зарядов, накопленных в предыдущем этапе дозированной зарядки положительными зарядами, а потом происходит обычный процесс накопления заряда в слое.

### Вольт-фарадные характеристики

Физический параметр диэлектрического слоя — электрическая емкость  $C$ , если известны геометрические параметры исследуемого образца, может быть рассчитана по формуле  $C_g = \epsilon \epsilon_0 S / d$  (здесь  $S$  — площадь,  $d$  — толщина и  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость образца,  $\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума) или по накопленному заряду  $Q$  и образованной разности потенциала  $V$  по формуле  $C = Q / V$ . ВФХ строятся по результатам измерения. При расчете соотношения измеренного значения накопленного заряда и потенциала определяется эффективная емкость  $C_{\text{eff}}$ , а при расчете соотношения прироста заряда и потенциала — дифференциальная емкость  $C_{\text{diff}}$  слоя. На рис. 6 и 7 представлены ВФХ эффективной и дифференциальной емкости, построенные на основе накопленных данных при периодической дозированной зарядке как положительными, так и отрицательными зарядами (рис. 4).

ВФХ эффективной емкости  $C_{\text{eff}}$  (рис. 6) строятся на основе расчета значений накопленного в слое количе-



**Рис. 6.** Зависимость эффективной емкости  $C_{\text{eff}}$  от величины поверхностного потенциала  $V$  слоя: 1, 2 — зависимость эффективной емкости слоя при положительной зарядке его поверхности, значение емкости слоя; 3, 4 — зависимость эффективной емкости слоя при отрицательной зарядке его поверхности.

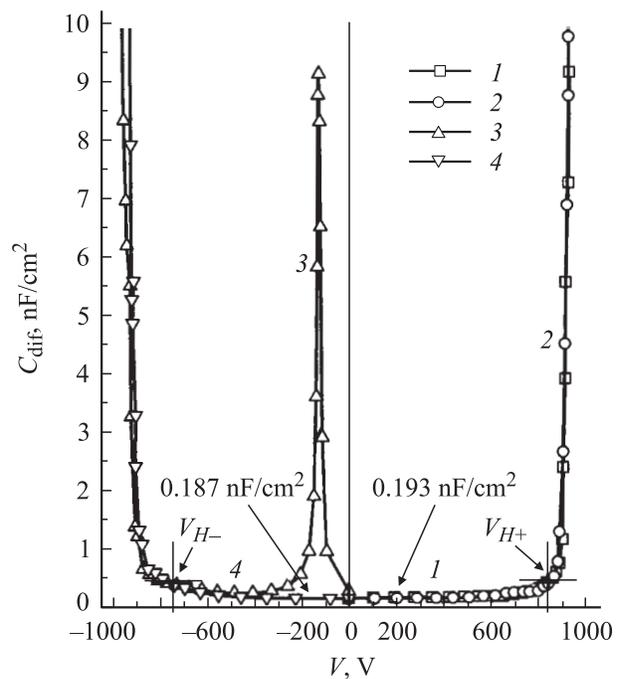
ства заряда  $Q$  и ему соответствующего поверхностного потенциала  $V$  слоя по формуле  $C_{\text{eff}} = Q/V$ . Поскольку при каждой периодической дозированной зарядке диэлектрического слоя величина накопленного количества заряда и величина поверхностного потенциала увеличивается, то рассчитанное значение эффективной емкости слоя может оставаться постоянной величиной или меняться. Обычно при малых значениях поверхностного потенциала эффективная емкость мало меняется, а при достижении значений, близких к напряжению пробоя, эффективная емкость слоя из-за увеличения тока через диэлектрический слой увеличивается (рис. 6, зависимости 1, 2 и 4). На рис. 6 также показана кривая 3, которая получена при периодической дозированной зарядке диэлектрического слоя во время третьего этапа (рис. 4). Из этой кривой видно, что процесс экстракции зарядов, накопленных в предыдущем этапе периодической дозированной зарядки положительными зарядами, которое происходит при малых значениях поверхностного потенциала (до  $-200$  В), вызывает увеличение рассчитанного значения эффективной емкости.

Для более точного выявления изменений зависимости емкости слоя от поверхностного потенциала, целесообразно использовать разностный метод определения емкости слоя, т.е. определить дифференциальную емкость диэлектрического слоя. Дифференциальная емкость диэлектрического слоя  $C_{\text{dif}}$  рассчитывается в каждом цикле измерений из разности измеренных значений количества

заряда, накопленного в слое  $\Delta Q$ , и из разности измеренных значений поверхностного потенциала слоя  $\Delta V$  соседних циклов по формуле  $C_{\text{dif}} = \Delta Q/\Delta V$ . Зависимости дифференциальной емкости слоя от величины его поверхностного потенциала, построенные по результатам, представленным на рис. 4, показаны на рис. 7.

Для идеального слоя зависимость емкости слоя от поверхностного потенциала (ВФХ) должна быть прямой линией и параллельной к оси напряжения. Также следует отметить, что для идеального слоя значения эффективной емкости  $C_{\text{eff}}$  и дифференциальной емкости  $C_{\text{dif}}$  должны быть одинаковыми и равными геометрической емкости  $C_g$ . Однако в реальных слоях из-за влияния разных факторов и физических явлений ВФХ отличаются от идеальных характеристик.

При сравнении рассчитанных значений как эффективной, так и дифференциальной емкости для значений поверхностного потенциала  $+200$  и  $-200$  В (рис. 6 и 7) видно, что значения рассчитанных емкостей мало отличаются. В случае положительного знака поверхностного потенциала значения емкостей —  $0.190$  и  $0.193$  нФ/см<sup>2</sup>, а в случае отрицательного знака —  $0.183$  и  $0.187$  нФ/см<sup>2</sup>. Однако можно заметить, что рассчитанные значения емкостей резко возрастают в тех областях, где происходят какие-то явления, которые несвойственны идеальному



**Рис. 7.** Зависимость дифференциальной емкости от величины поверхностного потенциала слоя: 1, 2 — зависимость дифференциальной емкости слоя при положительной зарядке его поверхности; 3, 4 — зависимость дифференциальной емкости слоя при отрицательной зарядке его поверхности,  $V_{H+}$  — значение предельного поверхностного потенциала слоя при положительной зарядке его поверхности,  $V_{H-}$  — значение предельного поверхностного потенциала слоя, при отрицательной зарядке его поверхности.

слою. Изучение причин этих изменений емкости является также задачей исследования диэлектрических слоев.

Определение предельного значения поверхностного потенциала слоя

При периодической дозированной зарядке реального диэлектрического слоя, когда значение поверхностного потенциала приближается к предельному, из-за увеличения тока через диэлектрический слой прирост поверхностного потенциала становится меньше, поэтому рассчитанная величина емкости диэлектрического слоя начинает возрастать. Это связано с тем, что заряды не выдерживаются на поверхности слоя из-за термополевой генерации дырок в объеме слоя или из-за инжекции дырок из металлической подложки. Увеличение тока разряда слоя может быть также обусловлено тем, что через существующие дефекты слоя заряды стекают к подложке слоя, что приводит к его разрушению. Для определения предельного значения поверхностного потенциала слоя можно пользоваться критерием двойного увеличения дифференциальной емкости слоя по отношению к начальному значению. Если при проведении измерений устанавливается, что емкость слоя быстро увеличивается, то при достижении двойного увеличения дифференциальной емкости фиксируется предельное значение поверхностного потенциала слоя. По рис. 7 видно, что предельное значение положительного поверхностного потенциала слоя равно +820 В, а предельное значение отрицательного поверхностного потенциала слоя –730 В.

Определение сопротивления утечки единичной площади диэлектрического слоя

Сопротивление утечки диэлектрического слоя рассчитывается по результатам, полученным после прекращения зарядки слоя во время этапов 1 и 3, когда происходит самопроизвольная разрядка слоя (рис. 4). Самопроизвольная разрядка слоя, обусловленная утечкой зарядов, вызывает изменение поверхностного потенциала. Если модель слоя представить в виде параллельного соединения резистора и конденсатора, а процесс разрядки считать экспоненциальным, то сопротивление утечки единичной площади диэлектрического слоя  $R_1$  можно рассчитать по формуле:

$$R_1 = \frac{\Delta t}{C_c \ln \frac{V_0}{V_t}} [\Omega \text{ m}^2],$$

где  $V_0$  — значение поверхностного потенциала слоя, для которого определяется сопротивление утечки слоя,  $V_t$  — значение поверхностного потенциала слоя после определенного промежутка времени  $\Delta t$ ,  $C_c$  — емкость на единичную площадь слоя, выраженная в  $\text{F/m}^2$ .

Поверхностные потенциалы  $V_0$  и  $V_t$  рассчитываются по результатам, накопленным во время этапов 1 и 3, которые представлены на рис. 4. Результаты представлены в относительных единицах на рис. 4 пересчитываются по следующим формулам:  $V_0 = V_i \frac{U}{U_{ki}}$ ,  $V_t = V_{i+1} \frac{U}{U_{k(i+1)}}$ , где  $i$  — порядковый номер расчета,  $V_i$  и  $V_{i+1}$  — значения

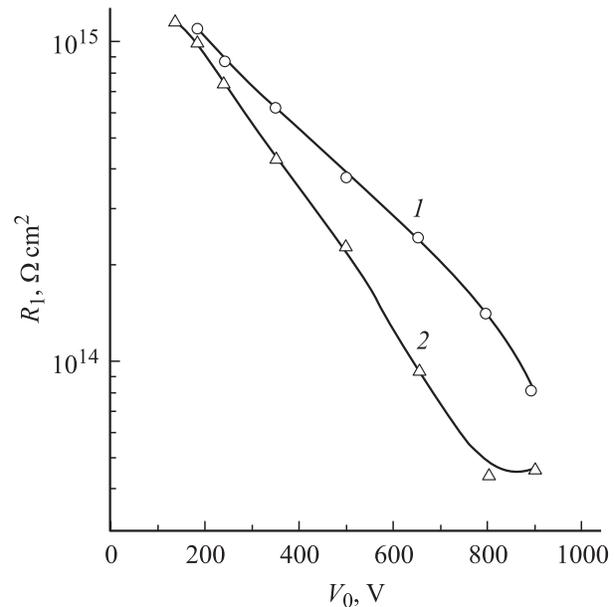


Рис. 8. Зависимость сопротивления утечки слоя  $R_1$  от его поверхностного потенциала  $V_0$ : 1 — для положительного поверхностного потенциала, 2 — для отрицательного поверхностного потенциала.

поверхностного потенциала слоя во время  $t_i$  и  $t_{i+1}$  соответственно,  $U_{ki}$ ,  $U_{k(i+1)}$  — значения калибровочного напряжения в относительных единицах,  $U$  — значение напряжения источника калибровочного напряжения.

На рис. 8 представлен результат расчета зависимости сопротивления утечки единичной площади диэлектрического слоя  $R_1$  от его поверхностного потенциала  $V_0$  для положительного и для отрицательного поверхностного потенциала (см. рис. 4, этапы 1 и 3). По представленному примеру (рис. 8) видно, что для исследованного диэлектрического слоя сопротивление утечки единичной площади диэлектрического слоя  $R_1$  при увеличении как положительного, так и отрицательного поверхностного потенциала  $V$  уменьшается и что это сопротивление для положительного и для отрицательного поверхностного потенциала различно. Эта разница объясняется процессами, происходящими внутри диэлектрического слоя.

Определение фоточувствительности слоя

По полученным результатам в интервале времени, когда во время самопроизвольной разрядки слоя он облучается красным светом и происходит быстрая разрядка слоя (рис. 4, этапы 2 и 4), определяется время полуспада поверхностного потенциала, которое используется для расчета фоточувствительности слоя  $S_\lambda$  по формуле [7]:

$$S_\lambda = \frac{\lambda}{hcNt_{0.5}} [\text{m}^2/\text{J}],$$

где  $\lambda$  — длина волны облучения,  $h$  — постоянная Планка ( $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж/с),  $c$  — скорость света,  $N$  — число квантов,  $t_{0.5}$  — время полуспада (время полуспада — интервал времени, на протяжении которого значение

поверхностного потенциала уменьшается до половины величины начального значения).

## Обсуждение результатов эксперимента и заключение

В настоящей статье на примере исследования светочувствительного высокоомного полимерного органического полупроводника показана эффективность бесконтактного измерения параметров диэлектрических слоев методом периодической зарядки их поверхности. Объектом исследования служил органический полупроводник, состоящий из фотогенерационного материала — мелкодисперсного безметаллического X-типа фталоцианина ( $H_2Pc$ ) и связывающего вещества — поливинилбутирала. Этой смеси свойственна дырочная электропроводность. Смесь методом полива нанесена на оксидированную поверхность алюминия. Таким образом была создана трехслойная структура, состоящая из органического полупроводника, окиси и металла.

Измерения проводились в нормальных условиях, т.е. температура окружающей среды составляла  $20^\circ C$ , влажность воздуха — 50%. Число измерений — 5 в секунду, накопление результатов (рис. 4) продолжалось 11 min.

Поскольку в начале каждого этапа измерения слой подвергается воздействию потока ионов, создаваемого генератором ионов в пространстве над слоем, то, чтобы избежать пробоя слоя, длительность накопления заряда ограничивается создаваемым поверхностным потенциалом, который не должен превышать на 20–30% предельное значение поверхностного потенциала слоя. В нашем примере длительность процесса зарядки составляет около 10 s, а поверхностный потенциал увеличивается почти до 1000 V. Как уже показано (рис. 7), для исследуемой структуры установлено, что предельное значение положительного поверхностного потенциала слоя равно +820 V, а отрицательного — –730 V.

Во время этапов 1 и 3, когда зарядка слоя прекращается, измеряется темновой спад потенциала слоя при самостоятельной разрядке, длительность которой в нашем примере составляет около 200 s. По этому спаду определяется время полуспада поверхностного потенциала, которое для положительного потенциала составляет 38 s, а для отрицательного — 20 s. Время полуспада поверхностного потенциала при разрядке слоя под внешним световым воздействием (этапы 2 и 4) для положительного поверхностного потенциала составляет 0.13 s, а для отрицательного — 0.71 s.

В результате проведенного исследования было установлено, что ВКХ и ВФХ в достаточно широком интервале поверхностных потенциалов являются прямолинейными. Эта прямолинейность при положительной дозированной зарядке сохраняется почти до +800 V, а при отрицательной — до –700 V. При дальнейшей дозированной зарядке как положительными, так и отрицательными ионами прирост потенциала уменьшается. Это показывает, что увеличивается ток, протекающий через слой. При

положительном поверхностном потенциале увеличение протекающего через слой тока может быть обусловлено термополевой генерацией дырок в объеме слоя, а при отрицательном предельном потенциале — инжекцией дырок из металлической подложки. Прямолинейность ВКХ показывает, что не только в начальной стадии дозированной зарядки, но и в определенном интервале поверхностного потенциала не происходит явления инжекции или экстракции носителей тока, и что во время дозированной зарядки слоя заряд накапливается только на поверхности слоя, заряжая его емкость. Зная толщину исследуемого диэлектрического слоя, можно определить его диэлектрическую проницаемость, в данном случае — 3.4.

По рис. 5–7 видно, что во время перезарядки слоя с положительного потенциала на отрицательный ВКХ и ВФХ 3 отличаются от характеристик 4. Если рассматривать ВКХ (рис. 5), то в первой ее части, т.е. от 0 до –100 V, отрицательный поверхностный потенциал с ростом осажденного заряда увеличивается линейно. При дальнейшем увеличении осажденного заряда в интервале от –100 до –220 V скорость роста потенциала значительно уменьшается (вторая часть), и только при достижении –220 V потенциал опять быстро увеличивается (третья часть). При превышении значения поверхностного потенциала –730 V рост его замедляется и достигает предельной величины, так как в этих условиях весь осажденный заряд стекает через исследуемый диэлектрический слой. Относительно медленный рост потенциала во второй части характеристики 3 при увеличении осажденного заряда показывает, что во время дозированной зарядки через ограниченный полупроводник течет дырочный ток, поэтому и эффективная, и дифференциальная емкость диэлектрического слоя в этой части значительно увеличивается (рис. 5, 6). Это связано с тем, что во втором этапе при экспонировании светом положительно заряженного фоточувствительного диэлектрического слоя дырки не рекомбинируют с электронами подложки, а в основном накапливаются на оксидной пленке алюминиевой подложки. Так как толщина оксидированной поверхности, которая находится между органическим полупроводником и алюминием, составляет около 5% толщины слоя, то значение дифференциальной емкости исследуемого диэлектрического слоя значительно возрастает (кривая 3 рис. 7). При следующей дозированной отрицательной зарядке исследуемого диэлектрического слоя его ВФХ выпрямляется и принимает вид кривой 4 (рис. 7). Это объясняется тем, что существовавший заряд дырок над диэлектрической оксидированной поверхностью алюминия нейтрализован.

Как было сказано, фоточувствительность слоя определяется по времени полуспада поверхностного потенциала при освещении слоя. Для рассматриваемого слоя получено, что при длине волны  $\lambda = 780 \text{ nm}$  и числе квантов  $N = 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  фоточувствительность слоя  $S_\lambda$ , в случае положительного поверхностного потенциала — 250, а в случае отрицательного —  $110 \text{ m}^2/\text{J}$ .

В заключение следует отметить, что форма зависимостей, показанных на рис. 5–8, не являются единственными. При проведении измерений разных диэлектрических слоев наблюдается, например, несимметричность по отношению к знаку потенциала зарядки; отклонение зависимостей от линейной формы даже при небольших значениях (порядка нескольких десятков вольт) поверхностного потенциала, которое часто связано с явлениями экстракции свободных и квазисвободных носителей зарядов из образованных, например, в органическом полупроводнике кристаллитов; неодинаковое значение предельного значения поверхностного потенциала слоя при положительном и отрицательном знаке осаждаемого заряда и т. д. Определяемые характеристики и параметры зависят от состава диэлектрического слоя, а также от свойств поверхности, на которую этот слой наносится.

Таким образом, метод измерения параметров диэлектрических слоев, основанный на периодической зарядке поверхности диэлектрических слоев и синхронного измерения накопленного заряда и поверхностного потенциала, может использоваться для исследования физических явлений, происходящих в органических и неорганических слоях. Этот метод также может быть применен для измерения параметров и характеристик разного рода изоляционных материалов, тонких пленок и полупроводниковых структур, используемых в электротехнике, в копировальной технике и в микроэлектронике. Метод обеспечивает бесконтактное и неразрушающее измерения параметров диэлектрических слоев.

## Список литературы

- [1] *Борисова М., Койков С.* Физика диэлектриков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 239 с.
- [2] ГОСТ 10405-63. Диэлектрики твердые. Пленки тонкие из высокомолекулярных соединений. Методы испытаний.
- [3] IEC 61340-2-3:2000. Electrostatics. Part 2–3: Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation.
- [4] *Лозовски Т.Л., Монтримас Э.А.* // Метрология. 1998. Т. 8. С. 29–36.
- [5] *Лозовски Т., Монтримас Э., Мотеюнас К.* и др. // А.с. СССР. 1486954. БИ. 1989. № 22. 3 с.
- [6] *Lozovski T., Montrimas E., Maldzius R.* // Synthetic Metals. 2000. Vol. 109. P. 195–198.
- [7] *Гренишин С.Г., Черкасов Ю.А.* // ЖниПФиК. 1962. Т. 7. № 2. С. 12.