

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЭЛЛИПСОМЕТР ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНКИ

© 1997, А.М.Бадалян, В.В.Каичев, Е.А.Подгорнов

Институт неорганической химии СО РАН, г.Новосибирск.

Поступила в редакцию 11.10.96

Описана схема высокочувствительного устройства для измерения величины угла поворота эллипса поляризации на основе модуляционного метода с вращающимся анализатором. Отличительной особенностью схемы является введенная отрицательная обратная связь по величине разности фаз исследуемого и опорного сигналов. Достигнута чувствительность устройства при измерении угла поворота на уровне 0.001 град.

Современные тенденции развития аналитических систем, предназначенных для исследования физико-химических процессов осаждения тонких слоев на поверхность твердого тела, состоят в обеспечении возможности непрерывного и одновременного автоматического контроля большого количества параметров непосредственно во время процесса (*in situ*) в реальном масштабе времени. Важнейшими параметрами в данном случае являются, в частности, толщина синтезированного слоя, оптический показатель преломления и коэффициент поглощения осажденного материала. Адекватным решением поставленной задачи представляется создание компактных, легко встраиваемых в технологические установки модуляционных эллипсометров, которые, в силу специфики формирования аналитического сигнала, позволяют достичь высоких уровня автоматизации измерения, быстродействия и соотношения сигнал/шум.

Модуляционный метод измерения угла поворота эллипса поляризации и эллиптичности при отражении лазерного излучения от твердой поверхности, базирующийся на вращении элемента в оптическом измерительном тракте, хорошо известен и используется в современной эллипсометрии [1-3]. В этом методе угол поворота определяется по эллипсу поляризации и эллиптичности при отражении лазерного излучения от твердой поверхности, базирующийся на вращении элемента в оптическом измерительном тракте, хорошо известен и используется в современной эллипсометрии [1-3]. В этом методе угол поворота определяется по величине фазового сдвига сигнала пропускания основного оптического тракта по отношению к опорному сигналу [4]. В

свою очередь, величина фазового сдвига измеряется различными фазометрами, преобразующими разность фаз в измеряемый электрический сигнал или временной интервал [5]. Ясно, что в этом случае существенное влияние на точность измерения будет оказывать зависимость фазы сформированного фазометром меандра от амплитуды синусоидального сигнала на входе фазометра.

В настоящей работе нами разработана и апробирована экспериментально схема с автоматической подстройкой фазы опорного меандра. Блок-схема устройства приведена на рис.1. Исследуемый световой пучок проходил через анализатор А, закрепленный во вращающемся с частотой 65 Гц обтюраторе О, и регистрировался фотоприемником ФП1. Обтюратор имел 4 маленьких отверстия, расположенных равномерно по окружности, через которые на фотоприемник ФП2 подавался опорный световой пучок от светодиода. Переменный сигнал с фотоприемника ФП1 подавался на усилитель У1, затем на полосовой фильтр ПФ и детектировался синхронным детектором СД. Выходной сигнал синхронного детектора интегрировался интегратором И, усиливался У3 и подавался на вход компаратора К. На второй вход компаратора подавался сигнал от генератора пилообразного напряжения ГПН, запуск которого осуществлялся по опорному каналу: фотоприемник ФП2 — усилитель У2 — формирователь импульса Ф1. Импульсы с компаратора далее подавались на формирователь импульса Ф2, который запускал D-триггер Т. Сформированный таким образом меандр подавался на опорный вход синхронного детектора. Постоянный сигнал с усилителя У3 подавался также на дифференциальный усилитель ДУ с регулируемым

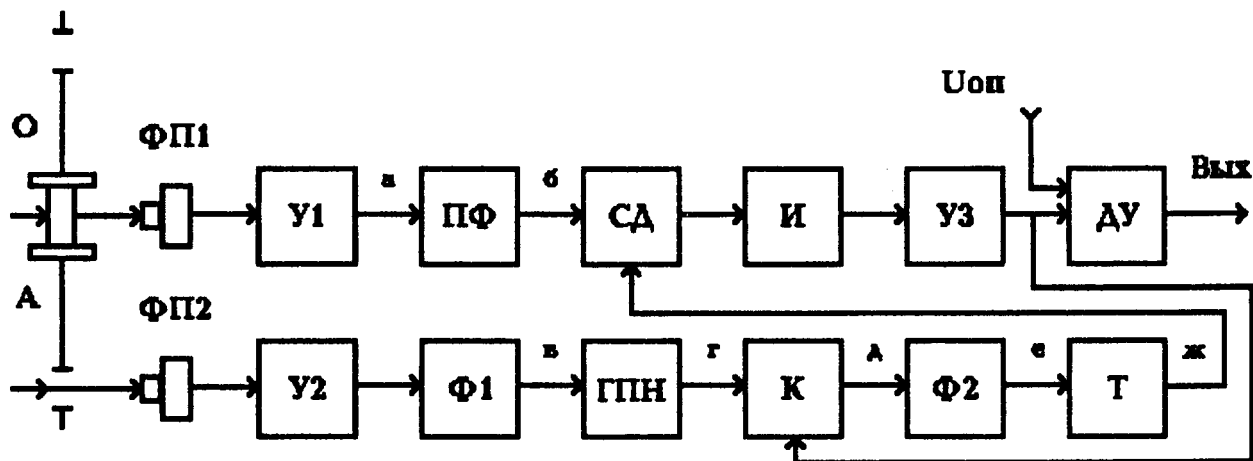


Рис. 1. Блок-схема устройства.

А — анализатор, О — обтюратор, ФП1-ФП2 — фотоприемники, У1-У2-У3 — усилители, ПФ — полосовой фильтр, СД — синхронный детектор, И — интегратор, ДУ — дифференциальный усилитель, Ф1-Ф2 — формователи импульсов, ГПН — генератор пилообразного напряжения, К — компаратор, Т — триггер.

коэффициентом усиления. Выход с ДУ являлся измеряемой величиной, соответствующей повороту эллипса поляризации света.

На рис.2 приведены эпюры напряжений, полученные в характерных точках, помеченных на блок-схеме. В точке а) при небольшой степени эллиптичности сигнал имел форму, близкую к описываемой функцией $U = \cos^2 \omega t$, где ω — круговая частота вращения анализатора. В связи с этим, переменная составляющая сигнала в точке б), ограниченная по спектральному составу полосовым фильтром вблизи основной гармоники, имела вид, близкий к гармоническому, с частотой

2ω . Опорный импульс, сформированный в точке в), ввиду надлежащей установки анализатора в обтюраторе, совпадал по фазе с сигналом основной гармоники б). После ГПН на вход компаратора в точке г) поступал пилообразный сигнал, который сравнивался с постоянным напряжением сигнала обратной связи. На выходе компаратора д) появлялись импульсы, передние фронты которых совпадали с моментами равенства напряжений на входах компаратора. Сформированные далее запускающие импульсы е) и меандр ж) обеспечивали опорное напряжение для синхронного детектора, подстраиваемое по фазе к исследуемому сигналу.

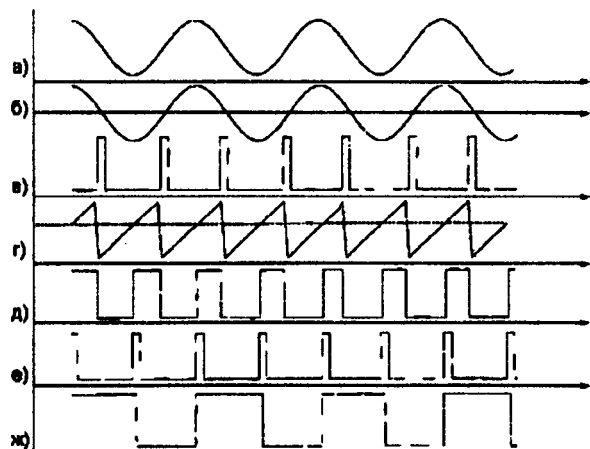


Рис.2. Эпюры напряжений в контрольных точках схемы.

В идеальном случае бесконечного коэффициента усиления тракта обратной связи фаза опорного сигнала будет подстраиваться так, чтобы постоянное напряжение с интегратора занулялось. Это означает, что фазы исследуемого и опорного сигналов будут автоматически скрещиваться, что является электронным аналогом оптического скрещивания анализатора с поляризацией излучения (нуль-метод). В этом случае изменение амплитуды исследуемого сигнала не влияет на измеряемый фазовый сдвиг. Кроме того, использование синхронного детектирования при формировании тракта обратной связи дает возможность с высокой эффективностью "очистить" измеряемый сигнал от высокочастотных шумов, в том числе и от нестабильностей, обусловленных неравномерностью расположения отверстий обтюратора и нестабильностью частоты его вращения [5].

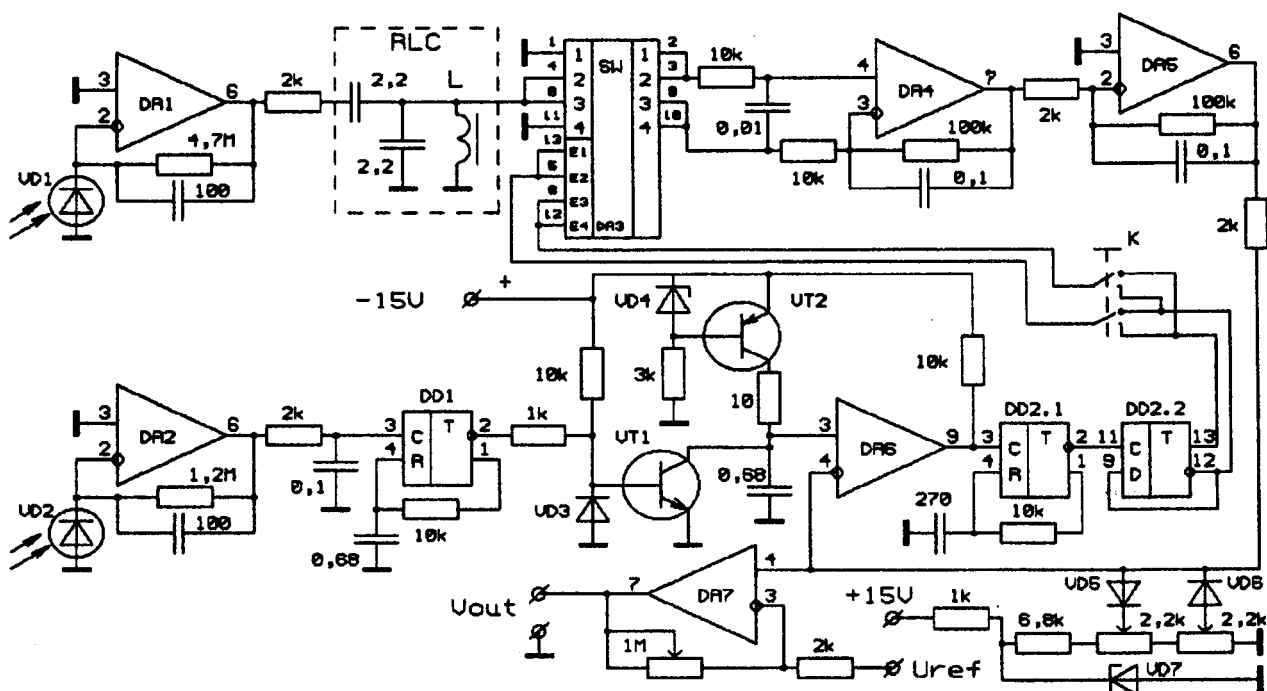


Рис.3. Принципиальная схема устройства.

VD1, VD2 - ФД25Б, VD3 - КД522А, VD4 - КС133А, VD5, VD6 - КД512, VD7 - КС191Ф, VT1 - КТ3102А, VT2 - КТ3107А, DA1, DA2, DA5 - К140УД6, DA3 - К561КТ3, DA4, DA7 - К140УД17А, DA6 - К554СА3, DD1, DD2 - К561ТМ2, L - 0,68 Гн.

Для того, чтобы продемонстрировать принципиальные возможности предложенной схемы, мы не стремились достичь рекордных значений параметров устройства, а ограничились самой простой оптико-механической и электронной конфигурацией. Принципиальная схема электронной части устройства изображена на рис.3. В качестве фотоприемников исследуемого и опорного излучения использованы фотодиоды VD1 и VD2, работающие в режиме фототока. Полосовой фильтр — пассивный RLC-фильтр, настроенный на основную гармонику исследуемого сигнала. Синхронный детектор и интегратор собраны на микросхемах DA3 и DA4, усилитель сигнала обратной связи — на микросхеме DA5. Сигнал опорного канала формируется на микросхеме DD1, импульс с которой поступает на вход генератора пилообразного напряжения, собранного на транзисторах VT1, VT2. Напряжения с выхода ГПН и обратной связи сравниваются на компараторе DA6, который формирует импульс подстройки фазы опорного сигнала. Этот импульс преобразуется в меандр с помощью микросхем

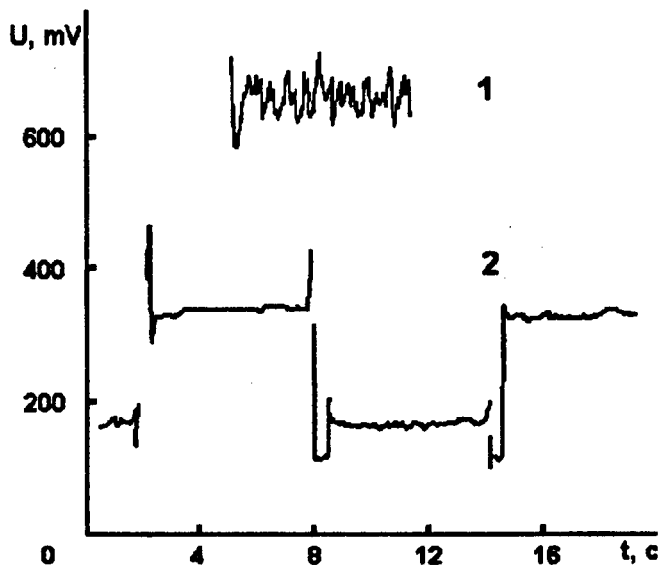


Рис.4. Изменение угла поворота плоскости поляризации от времени.

Показаны уровни сигналов при ступенчатом изменении угла поворота плоскости поляризации на 0,25 град. (1 - уровень шума в режиме измерения усиленный в 10 раз; 2 - выходной сигнал).

DD2.1, DD2.2 и поступает на опорный вход синхронного детектора. При достаточной линейности выхода ГПН величина сигнала обратной связи пропорциональна сдвигу фазы, т.е. углу поворота эллипса поляризации света, и представляется в необходимом масштабе с помощью масштабного усилителя DA7.

На рис.4 приведен график изменения сигнала на выходе устройства при модельном повороте поляризации на угол $0,25^\circ$ и установленной постоянной времени прибора ~ 1 с. Нами не обнаружено разницы в величине изменения выходного сигнала при вариации амплитуды входного сигнала более, чем на порядок.

“Разрывы” в графике между уровнями сигнала соответствуют моментам введения моделирующей ячейки в измерительный канал и ее удалению из канала. Видно, что система автоподстройки “теряет” привязку к нулевой разности фаз, но при появлении сигнала автоматически восстанавливает привязку с новым значением угла поворота поляризации. Эту особенность системы удобно использовать для определения количества порядков набега фазы при непрерывном контроле роста пленок *in situ*.

Несмотря на указанную выше преднамеренную упрощенность конкретного воплощения устройства, схема оказалась довольно устойчивой по отношению к различного рода акустическим и

электромагнитным помехам. Из графика видно, что среднеквадратичная ошибка определения угла поворота составляет величину $\sim 0.001^\circ$, что сравнимос рекордными значениями известных модуляционных эллипсометров. Из графика видно, что среднеквадратичная ошибка определения угла поворота составляет величину ~ 0.001 град., что сравнимо с рекордными значениями известных модуляционных эллипсометров. Более того, относительно небольшая величина постоянной времени регистрирующей системы позволяет осуществлять единичное измерение эллипсометрических параметров в течение нескольких секунд, т.е. практически непрерывно по сравнению с обычными для технологии выращивания слоев скоростями роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981, 584 с.
2. Горшков М.М. Эллипсометрия. М.: Сов. Радио, 1974, 200 с.
3. Collins R.W. // Rev.Sci.Instrum. 1990, v.61, N8, p.2029-2062.
4. Suits J.S. // Rev. Sci. Instrum. 1971, v.42, N1, p.19-22.
5. Гольдштейн С.Ш., Мукимов К.М., Сигал Г.П., Соколов Б.Ю. // ПТЭ. 1992, N6, с.113.

FAST ELLIPSO METER FOR CONTINUOUS MEASUREMENT OF FILM PARAMETERS

A.M.Badalian, V.V.Kaichev, E.A.Podgornov

Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch RAS, Novosibirsk

A high-sensitive device based on well-known rotating analyser modulation technique for measurement of rotation angle of the polarization ellipsoid is described. A distinguished feature of the device is a negative feedback proportional to the magnitude of phase shift in the analysed and reference signals. The sensitivity value achieved for the rotation angle is about 0.001 degree.