

На основании модели, разработан квантрон. В качестве элементов накачки использовались матрицы лазерных диодов в количестве 21, каждая мощностью 500 Вт. Компоновка матриц по спектральным характеристикам производилась в случайном порядке, разброс центральной волны излучения матриц 806-809 нм. В качестве материала корпуса квантрона использовался дюраль. Крепление активного элемента в квантроне осуществляется посредством клея Эласил в центральной его части. Клей выполняет как функцию крепления активного элемента, так и функцию теплопереноса. Моделирование в программной среде ANSYS показало, что за полный рабочий цикл при таком типе крепления активного элемента, его нагрев не превысит 15⁰C [1].

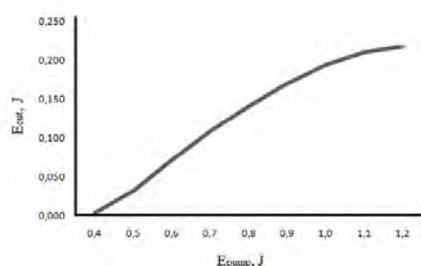


Рисунок 4 – Зависимости выходной энергии лазера от энергии накачки в режиме моноимпульса

На базе теоретической модели разработана экспериментальная модель лазерного излучателя. В качестве модулятора добротности использовался кристалл DKDP с пропусканием 92%. На

рисунке 4 приведена экспериментальная зависимость энергии на выходе лазерного излучателя от накачки в режиме активной модуляции добротности.

При энергии накачки в 0.93 Дж энергия на выходе излучателя составила 195 мДж при длительности импульса 6.6 нс. Расходимость на выходе излучателя не превысила 0.7 мрад. Дальнейший рост энергии накачки приводит к минимальному увеличению выходной энергии и росту расходимости излучения. При стартовой температуре 18⁰C за полный рабочий цикл в 8 минут изменение расходимости не наблюдается. При температуре запуска в 20⁰C наблюдается рост расходимости в пределах 0.08 мрад, при температуре запуска 23⁰C наблюдается значительный рост расходимости и изменения модового состава в течении цикла работы, что связано со смещением спектра излучения матриц и перераспределением поглощенной энергии накачки внутри активного элемента. Оптимальной с точки зрения стабильности параметров излучения является работа матриц накачки с пиком излучения в пределах 804-806 нм, так как, с учетом ширины спектра излучения 2.5 нм, эффективный коэффициент поглощения энергии накачки изменяется в пределах 10%.

1. Орехов К.А. Моделирование лазерного излучателя на основе Nd:YAG с пассивным охлаждением для измерения расстояний. – Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 1. – С. 50-57

УДК 681.2.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ОТ ПОТЕНЦИАЛА КОМПЕНСАЦИИ В МЕТОДЕ КЕЛЬВИНА–ЗИСМАНА

Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Динамический конденсатор Кельвина–Зисмана широко применяется в устройствах различного назначения: сканирующие зонды Кельвина (*Scanning Kelvin Probe*), устройства контроля поверхности при различных воздействиях (механическая обработка, трение, температура, адсорбция/десорбция и т.д.), датчики газов и жидкостей и др. Принципы их построения достаточно хорошо проработаны. Однако остаются и недостатки. К их числу относятся: высокая предельная погрешность, длительное время одного измерения и низкая чувствительность.

В методе Кельвина–Зисмана поверхности эталонного и измеряемого образца образуют конденсатор, между которыми измеряют контакт-

ную разность потенциалов (КРП). Одна из обкладок (как правило, эталонная) колеблется под действием электромеханического вибратора. Вследствие различия работ выхода электрона материалов обкладок конденсатора, он будет иметь заряд пропорциональный КРП:

$$Q = C \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{e} = CU_{\text{КРП}}, \quad (1)$$

где: C – электрическая емкость конденсатора, φ_1 и φ_2 – работа выхода электрона поверхностей эталонного и измеряемого образца, соответственно, e – заряд электрона, $U_{\text{КРП}}$ – КРП.

Периодические изменения емкости создают переменный ток в цепи динамического конденсатора:

$$i(t) = U_{\text{КРП}} \frac{dC(t)}{dt} \quad (2)$$

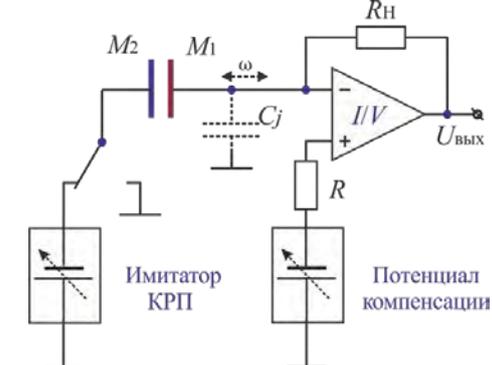
Измерительная процедура заключается в подаче на одну из пластин внешнего постоянного потенциала $U_{\text{комп}}$ для компенсации КРП.

В случае полной компенсации переменный ток уменьшается до нуля (3), а по значению внешнего компенсирующего потенциала определяют КРП.

$$i(t) = (U_{\text{КРП}} + U_{\text{комп}}) \frac{dC(t)}{dt} = 0 \quad (3)$$

В современных измерительных системах, потенциал компенсации вырабатывается автоматически с помощью специальных приборов (фазовые детекторы (*Lock-in*) и интеграторы). Как и в любой следящей системе, точность измерения КРП зависит от постоянной времени цепи обратной связи, которая включает интегратор. На практике время установления нулевого сигнала достигает несколько секунд. Скорость измерения имеет существенное значение в системах сканирования потенциала поверхности.

Кроме того определение нулевой амплитуды сигнала $i(t) = 0$, сопряжено с целым рядом погрешностей (собственные шумы, электромагнитные наводки, паразитные динамические конденсаторы, образованные зондом и конструктивными элементами), которые в совокупности определяют чувствительность зонда.



C_j – паразитные динамические конденсаторы, образованные вибрирующим зондом и элементами измерителя

Рисунок 1 – Функциональная схема установки для исследования параметров компенсационной зависимости измерительного сигнала от потенциала компенсации

Если рассматривать динамический конденсатор Кельвина-Зисмана, как идеальный, то уравнение (3), описывающее переменный ток в цепи, можно представить в виде линейной функции:

$$i(t) = a + bU_{\text{комп}}, \quad (4)$$

где $a = U_{\text{крп}} \frac{dC}{dt}$, $b = \frac{dC}{dt}$.

В этом случае, задача определения нулевой амплитуды сигнала сводится к решению простого линейного уравнения.

Исследования в рамках модели формирования зависимости выходного сигнала от потенциала компенсации проводили на специально разработанном макете, функциональная схема которого приведена на рисунке 1. Макет включает динамический конденсатор, источник постоянного потенциала компенсации и имитатор КРП. Подавая поочередно фиксированные значения потенциала компенсации ($B_1 \dots B_n$) на одну из обкладок измерительного динамического конденсатора, можно построить зависимость переменного сигнала на выходе от потенциала компенсации, т.е. $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{комп}})$ (рисунок 2).

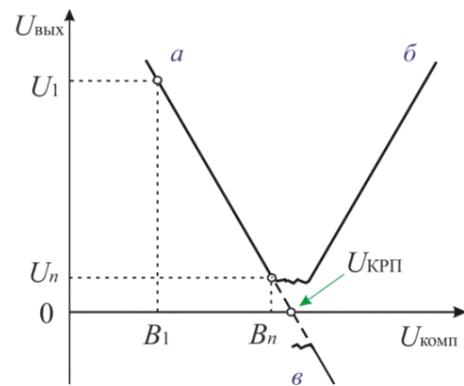


Рисунок 2 – Схематичное представление компенсационная зависимость выходного сигнала от потенциала компенсации (а) при фазовом (б) и амплитудном (в) детектировании

Исследования показали (рисунок 2), что при использовании фазового детектирования выходной сигнал линейно уменьшается с приближением напряжения компенсации $U_{\text{комп}}$ к КРП $U_{\text{крп}}$ (ветвь а). В идеальном случае, ветвь а пересекает ось абсцисс в точке ($U_{\text{комп}} + U_{\text{крп}} = 0$). При дальнейшем повышении напряжения компенсации, полярность пластин конденсатора изменяется на противоположную, и, соответственно, фаза выходного сигнала изменяется на 180° (ветвь б).

В случае амплитудного детектирования (ветвь в) выходной сигнал после достижения нуля линейно возрастает, и компенсационная зависимость приобретает характерный V-образный вид. Таким образом, ветви б и в зависимости симметричны относительно оси абсцисс. Получить идеальную V-образную компенсационную зависимость практически невозможно (рисунок 2). В окрестности точки компенсации из-за влияния паразитных факторов соотношение сигнал/шум становится меньше единицы. Таким образом, существует область неопределенности и значительная погрешность.

Следует учитывать, что вклад в соотношение сигнал/шум будут вносить как постоянные погрешности (собственные шумы, различные электромагнитные наводки и др.), не зависящие от точки компенсации, так и зависящие от потенциала компенсации составляющие погрешность от паразитных КРП [1]. Тогда минимальное значение U_n (рисунок 2) до которого можно скомпенсировать выходной сигнал и, следовательно, погрешность измерения КРП будет являться функцией от потенциала компенсации.

Для экспериментального уточнения зависимости минимальной погрешности от потенциала компенсации необходимо построить функцию $U_n = f(U_{\text{комп}})$. Это удобно сделать с помощью дополнительного источника постоянного потенциала, имитирующего КРП (рисунок 1). При этом для исключения влияния паразитных электромагнитных наводок, измерение U_n необходимо осуществлять на частоте модуляции емкости динамического конденсатора.

Результаты моделирования для измерительной установки КРП с коэффициентом преобразования совместно с коэффициентом усиления ($KA = 200$) приведены на рисунке 3. Минимальная погрешность составила 1 мВ при потенциале компенсации 100 мВ.

Настоящая методика может быть использована непосредственно при построении измерительных установок КРП, когда требуется проработка схемотехнического дизайна и взаимного расположения элементов конструкции зонда. В частности, по известной зависимости $U_n = f(U_{\text{комп}})$ может быть уменьшено влияние

паразитных динамических емкостей и последовательное устранение электромагнитных наводок. Также можно зафиксировать потенциал компенсации в области минимальной погрешности и компенсировать выходной сигнал с помощью дополнительного источника постоянного потенциала.

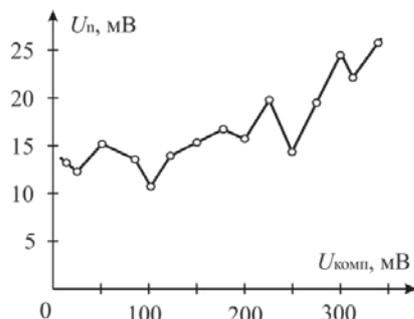


Рисунок 3 – Зависимость некомпенсированного сигнала от потенциала компенсации

С другой стороны, зная параметры линейной зависимости выходного сигнала от потенциала компенсации в режиме «большого», когда соотношение сигнал/шум высоко, можно методом линейной аппроксимации вычислить нулевую амплитуду сигнала. В этом случае погрешность от неполной компенсации может быть полностью исключена и, следовательно, исключена область неопределенности, имеющаяся в традиционных установках для измерения КРП по методу Кельвина-Зисмана.

1. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Мн.: Бестпринт, 1996. – С. 235.

УДК 681.2.08

УПРАВЛЕНИЕ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ ОБКЛАДКАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА В МЕТОДЕ КЕЛЬВИНА–ЗИСМАНА

Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Динамический конденсатор Кельвина–Зисмана, является одним из наиболее чувствительных методов измерения контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностями эталонного и измеряемого образца. Хорошо известно, что на КРП оказывают существенное влияние изменения химического и фазового состава, атомарные дефекты, деформационные процессы в материале поверхностного слоя, десорбция и адсорбция атомов и молекул из окружающей среды. Поэтому измерения пространственного распределения поверхностного потенциала находят широкое применение в практике фундаментальных и прикладных исследований.

Пространственное разрешение метода в основном ограничивается размером эталонной по-

верхности зонда. Как правило, ее поперечные размеры не превышают 1 мм. Емкость динамического конденсатора при этом мала и, соответственно, мал ток в цепи. Из-за влияния ряда паразитных факторов, уменьшается и чувствительность измерений. В тоже время, погрешность измерения КРП методом Кельвина-Зисмана сильно зависит от расстояния между поверхностями зонда и измеряемым образцом [1]. Это связано с перераспределением соотношения сигнал/шум. Для компенсации данного эффекта расстояние между обкладками динамического конденсатора должно быть минимально допустимым и неизменным во всем цикле сканирования поверхности.