

Диагностический программно-аппаратный комплекс для шумового зондирования термокатодов на основе системы сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS

М. Д. ВОРОБЬЕВ, Е. М. ШИТОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: vorobyevMD@mpei.ru

Разработано оборудование, основанное на измерении шумов, создаваемых катодами в электровакуумных приборах, и предназначенное для диагностики термоэлектронных катодов в условиях массового производства. Решены проблемы автоматизации и помехозащищенности для сокращения времени диагностики. Создано программное обеспечение для управления режимами измерений, исследования шумовых характеристик и нахождения информативных шумовых параметров.

Ключевые слова: шумовые характеристики, диагностика, информативные параметры, термоэлектронные катоды.

The equipment for diagnostics of thermionic emitting cathodes at mass production and based on measurement of noise generated by cathodes in electronic devices has been developed. The problems of automation and noise immunity during measurements for restriction of diagnostics time are considered and solved. A software allowing to control the measurement modes and to carry out the noise characteristics studies and to find the noise informative parameters has been created.

Key words: noise characteristics, diagnostics, informative parameters, thermionic emitting cathodes.

Широкий круг задач, решаемых в ряде современных радиоэлектронных устройств с помощью мощных электровакуумных сверхвысокочастотных приборов (например, в телекоммуникационных, навигационных системах), вызывает необходимость повышения надежности этих приборов как в целом, так и отдельных их частей. Одним из наиболее ответственных узлов, часто подверженных деградации, приводящей к параметрическим и катастрофическим отказам, является катодно-подогревательный. В нем в качестве эмиттера, обеспечивающего получение электронного потока с высокой плотностью, чаще других применяют термоэлектронные металлопористые катоды (МПК) различных модификаций и конструкций. Для повышения надежности требуется своевременная диагностика, позволяющая еще на этапе сборки в максимальной степени исключить использование некачественных катодов.

Диагностика термоэлектронных катодов, в частности металлопористых, как правило, проводится по результатам импульсного токового зондирования, по которым судят об эмиссионных свойствах при оперативном контроле. В то же время известно, что эмитирующая поверхность МПК неоднородна и состоит из сильноэмитирующих участков, окруженных слабоэмитирующими, причем вторые занимают значительно большую площадь, чем первые, и могут свидетельствовать о технологических недостатках [1]. Традиционные методы контроля, ориентированные в основном на токовые характеристики, позволяют определить параметры сильноэмитирующих участков, в то время как слабоэмитирующие, по существу являющиеся дефектами, находятся за пределами контроля.

В связи с этим при разработке методов диагностики МПК привлекали внимание те, что обладали достаточной чувствительностью для обнаружения дефектов, но не были сконцентрированы на бездефектных участках. Подобные методы существуют в полупроводниковой электронике и основаны на измерениях шумовых характеристик, возникающих из-за дефектов.

В [2, 3] представлены результаты разработки шумовой модели неоднородного по эмиссии термокатода и методики нахождения шумовых параметров по зависимостям уровня дробового шума от анодных тока и напряжения в плоском диоде, соответственно ампер-шумовым (АШХ) и вольт-шумовым (ВШХ) характеристикам. Диагностика по этим характеристикам возможна, так как они в значительной мере определяются слабоэмитирующими участками катодов. Одно из основных условий при создании оборудования для оперативной диагностики в условиях массового производства — высокая производительность, которую можно обеспечить лишь на основе автоматизации процесса диагностики и использования компьютерных технологий при определении шумовых параметров.

В данной работе приведено описание автоматизированного программно-аппаратного комплекса и способов решения наиболее важных задач, связанных с его эксплуатацией.

Метод измерения шумов. Объекты для измерений — плоские электровакуумные диоды с диагностируемыми МПК. Частотный диапазон, в котором можно проводить измерения, должен удовлетворять условиям, когда в шумах преобладает дробовая составляющая [2]. Учитывая, что фликкерная составляющая шума сильнее зависит от анодного тока I ,

частотный диапазон для измерений дробовой составляющей должен определяться диапазоном значений I . В то же время токи следует выбирать так, чтобы существовала возможность оценить влияние слабоэмиттирующих участков в соответствии с моделью [3], т. е. экспериментальный диод должен работать в режиме глубокого пространственного заряда. В целом для определения условий измерений для каждого типа МПК необходимо провести предварительные исследования. Как показано в [3], для измерений дробовой составляющей шума приемлемая частота $f = 1$ МГц.

Выбор метода измерений шума обусловлен такими факторами, как простота, помехоустойчивость и возможность автоматизации. На частотах около 1 МГц чаще других используют два метода — прямое измерение с предварительной калибровкой и сравнение с шумом эталонного источника [4]. С точки зрения указанных выше факторов, предпочтительнее первый метод, хотя он требует периодического повторения калибровки.

Модуль для измерения дробовых шумов построен по традиционной схеме (рис. 1) и содержит усилитель с резонансной амплитудно-частотной характеристикой, детектор шумового напряжения, вольтметр для измерений продетектированного напряжения, источники постоянного напряжения питания экспериментального диода, а также вольтметры для контроля напряжения U и силы тока I диода. В схеме использованы электролитические и керамические конденсаторы для снижения влияния внешних помех в различных диапазонах частот.

Усилитель состоит из трех каскадов: первый (входной) собран на малошумящем операционном усилителе LT1028, остальные — на AD286. Резонансный LC-контур включен на выходе третьего каскада и настроен на частоту 1 МГц, эффективная шумовая полоса составляет 90 кГц, коэффициент усиления может регулироваться в пределах $8 \cdot 10^3$ — $7,2 \cdot 10^4$. Для уменьшения наводок и помех питание всех каскадов усилителей осуществляется от интегральных стабилизаторов с фильтрующими цепями. Детектор построен на аналоговой микросхеме AD8361. Сопротивление в цепи нагрузки R_H определяет уровень шумового сигнала на выходе и подбирается опытным путем в зависимости от дифференциального сопротивления R_d экспериментального диода. Установлено, что собственный шум усилителя остается неизменным при $R_H < 400$ Ом и $R_d = 0,5 \dots 50$ кОм.

Шум, создаваемый катодом в экспериментальном диоде, измеряют в единицах спектральной плотности ($A^2/Гц$) флуктуаций тока $S_i(f)$ по показаниям вольтметра, подклю-

ченного к выходу детектора, а также с учетом собственного шума усилителя и входных цепей. Предварительно проводится калибровка усилителя с помощью источника шума, позволяющая связать показания вольтметра со спектральной плотностью флуктуаций напряжения на входе усилителя $S_u(f)$. Для определения $S_i(f)$ необходимо знать R_d , R_H :

$$S_i(f) = S_u(f)[R_d R_H / (R_d + R_H)]^{-2}. \quad (1)$$

Помимо спектральной плотности $S_i(f)$, которая для дробового шума не зависит от частоты, при измерениях часто используют ток эквивалентного шумового диода $I_{ш}$:

$$S_i(f) = 2eI_{ш},$$

где e — заряд электрона.

В режимах, когда дробовый шум демпфируется пространственным зарядом, $I_{ш} < I$. Погрешность измерения шума составляет $\delta > 10\%$ при $I_{ш} < 10$ мкА и $\delta < 5\%$ при $I_{ш} > 50$ мкА.

Как следует из (1), при определении создаваемых катодом шумов необходимо одновременно измерять R_d , которое зависит от анодного тока I . Наиболее корректно находить R_d на частоте измерения шума $f = 1$ МГц, однако совмещение измерений шума и R_d невозможно, так как последнее сопряжено с необходимостью подключения к диоду источника малого гармонического сигнала. В целях дальнейшей автоматизации измерений $I_{ш}$ значение R_d получали по вольт-амперной характеристике (ВАХ) экспериментального диода: $R_d = \Delta U / \Delta I$, где ΔU , ΔI — интервалы изменения постоянных токов и напряжений на диоде при изменении I в процессе снятия АШХ, ВШХ и ВАХ. Поскольку определяемое таким образом R_d может отличаться от результатов измерений на частоте 1 МГц, то были исследованы и проведены сравнения зависимостей $R_d(I)$, полученных как по статической ВАХ, так и с помощью генератора гармонического напряжения на частотах 50 Гц — 1,5 МГц. Показано, что найденные различными способами значения R_d в указанном диапазоне частот практически совпадают с результатами определения по ВАХ для диодов с межэлектродными расстояниями 0,2—0,6 мм при токах $I = 0,5$ —10 мА.

Автоматизация процесса измерения шумовых характеристик. Процесс измерений с помощью разработанного модуля в ручном режиме занимает относительно много времени. Наряду с шумовой характеристикой приходится снимать ВАХ и в каждой ее точке определять R_d . В результате предварительных исследований образцов было установлено, что для перехода к автоматическому режиму им необходимо обеспечить:

автоматическое изменение анодного напряжения в диапазоне 0—30 В при токе до 10 мА;

измерение напряжения на выходе детектора в пределах 0—2 В;

математическую обработку данных, их графическое отображение и формирование текстового файла с результатами измерений для дальнейшей обработки.

Требованиям по диапазонам измеряемых и формируемых напряжений соответствует оборудование, содержащее цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) для управления анодным напряжением U_a и аналогово-циф-

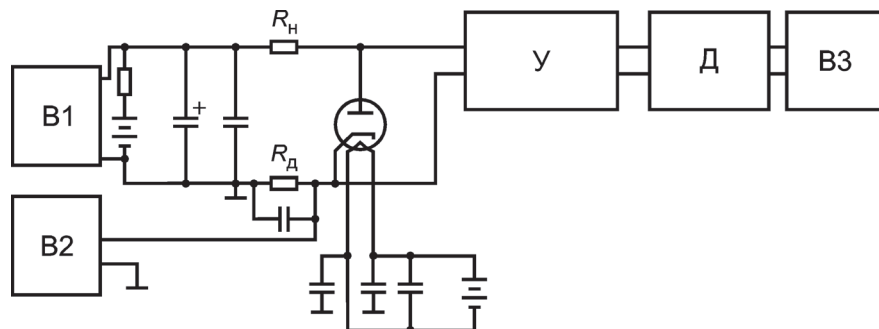


Рис. 1. Схема модуля для измерений дробового шума: В1—В3 — вольтметры; У — усилитель; Д — детектор

ровой преобразователь (АЦП) для одновременного измерения напряжений на датчике анодного тока $U_{\text{дат}}$, на выходе детектора $U_{\text{дет}}$ и анодного напряжения U_a . Принципиальное значение имеет гальваническая развязка ЦАП и АЦП; при ее отсутствии невозможно одновременно обеспечить помехоустойчивость из-за появления паразитного контура и устранить влияние ЦАП на АЦП.

Для решения задачи измерений U_a , $U_{\text{дат}}$, $U_{\text{дет}}$ а также управления анодным напряжением использован программно-аппаратный комплекс NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite), у которого функциональные возможности набора типовых измерительных приборов реализованы на осно-

ве многофункционального устройства ввода-вывода, специальной настольной рабочей станции, макетной платы и программ, разработанных в среде LabVIEW, имеющей широкие возможности как в математической обработке, так и в графическом представлении полученных данных. Использование готовых программных модулей LabVIEW упрощает написание программы и делает ее более наглядной, что значительно ускоряет процесс отладки.

Структурная схема автоматизированного комплекса для измерений шумовых характеристик показана на рис. 2. Она включает модуль измерений шумов, преобразователь уровня напряжений, устройство сбора данных NI ELVIS и персональный компьютер.

Параметры АЦП в NI ELVIS позволяют работать с сигналами от датчика тока и детектора без дополнительных промежуточных устройств. В то же время параметры ЦАП, смонтированного на платформе NI ELVIS, не соответствуют требованиям по максимальным значениям напряжения и силы тока. При использовании ЦАП для автоматизации измерительной системы (формирования анодного напряжения) необходимо повысить амплитуду выходного сигнала до 30 В. Эту роль выполняет специальное устройство — преобразователь уровня напряжения, построенный на базе изолирующего усилителя ISO124 и мощного операционного усилителя ОРА547 с гальванической развязкой входной и выходной цепей. Диапазоны напряжений входного 0—10 В, выходного

0—50 В, что достаточно для управления анодным напряжением. Максимальный выходной ток преобразователя 450 мА, что значительно превышает требуемый минимальный 10 мА.

Программное обеспечение для выполнения измерений. Созданная в среде LabVIEW компьютерная программа управ-

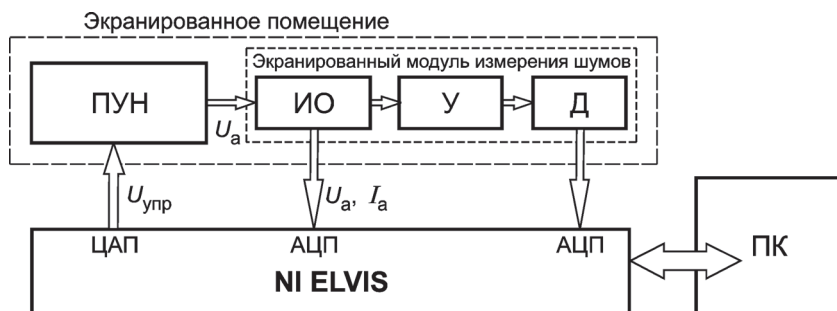


Рис. 2. Структурная схема автоматизированного комплекса для измерений шумовых характеристик:

ПУН — преобразователь уровня напряжения; ИО — исследуемый образец; ПК — персональный компьютер; АЦП, ЦАП — аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи. Остальные обозначения как на рис. 1

ляет работой измерительного комплекса: задает напряжение ЦАП, измеряет напряжения в каналах АЦП, формирует данные для получения АШХ, ВШХ, ВАХ, $R_d(I_a)$. Эти зависимости в дальнейшем используют для вычислений диагностирующих шумовых параметров. Модульная структура алгоритма управляющей программы показана на рис. 3.

Процесс измерений происходит в следующей последовательности. В модуле управления напряжением генерируется сигнал, соответствующий анодному напряжению экспериментального диода, который поступает на ЦАП и далее на анод диода. Затем с датчиков значения I_a , U_a , $U_{\text{дет}}$ по трем каналам подаются в модуль преобразования параметров, где рассчитываются их истинные значения с учетом параметров датчиков. При этом для снижения погрешностей применяют стандартный модуль нахождения среднего значения для обработки данных в среде LabVIEW. Полученные значения I_a , U_a , $U_{\text{дет}}$ используют для расчета R_d , $I_{\text{ш}}$, после чего они поступают в модуль отображения характеристик и формирования файлов данных.

Управляющая программа задает границы изменения U_a и скорость его нарастания, перед измерением каждой шумовой характеристики определяет собственный шум установки для последующего учета при расчете $I_{\text{ш}}$, выводит в режиме реального времени результаты расчета на экран монитора, т. е. показывает ВАХ, $R_d(I_a)$, АШХ в процессе измере-

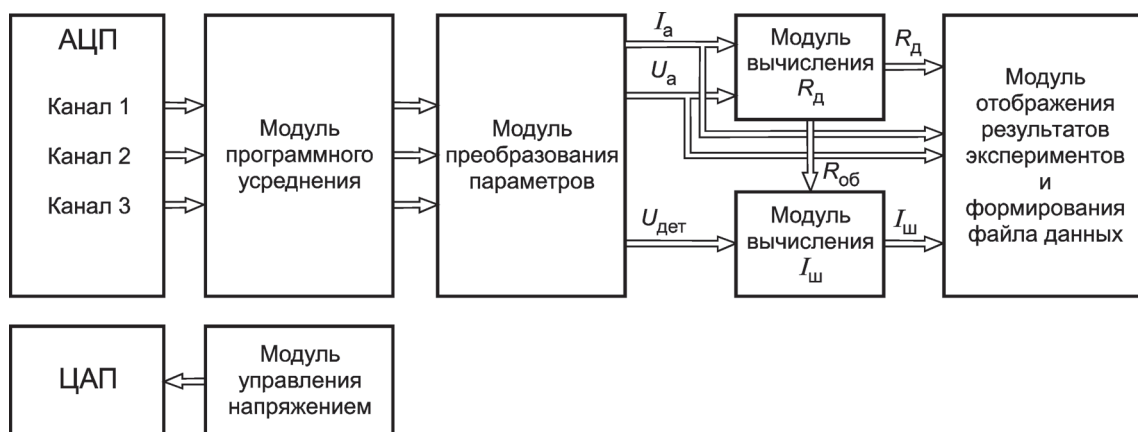


Рис. 3. Алгоритм управляющей программы

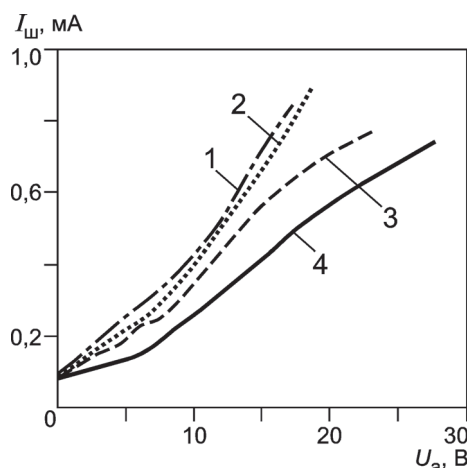


Рис. 4. Вольт-шумовые характеристики диодов с однотипными металлопористыми катодами, полученные после проведения шумового зондирования в автоматическом режиме:

1—4 — порядковый номер диода

ний, а также сохраняет все полученные при измерениях результаты для последующего расчета информативных шумовых параметров.

Измерения выполняют в пошаговом режиме: необходимое для снятия характеристик время зависит от диапазона анодного тока и нарастания U_a на каждом шаге и длительности Δt шага. Предусмотрена возможность изменения каждой из перечисленных величин, что позволяет выбирать оптимальные условия измерений для конкретного типа катода и экспериментального образца. Снижением значения нарастания U_a можно получить исследуемые зависимости с большим числом точек, следовательно более детально выявить их характер, но в то же время это приводит к росту продолжительности измерений. Уменьшение Δt сокращает время измерений, однако может привести к возрастанию погрешности измерения $I_{ш}$. Как показали исследования, это связано с возникновением токов перезарядки конденсатора на входе предварительного каскада шумового усилителя. Установлено, что отношение нарастания U_a к Δt не должно превышать 15 мВ/с. Абсолютное значение U_a при измерениях может меняться в пределах 0—50 В, максимальный анодный ток должен быть 50 мА, а максимальный уровень измеряемого шума $I_{ш} = 2$ мА. При $I_{ш} < 10$ мкА погрешность превышает 10 %, при $I_{ш} > 50$ мкА снижается до 5 % и менее.

На рис. 4 показаны ВШХ для однотипных катодов, полученные с помощью диагностического комплекса. Различие характеристик свидетельствует о разном содержании и па-

раметрах дефектных слабоэмитирующих участков, переходящих в режим насыщения при разных U_a и создающих перегибы на характеристиках. Обработка каждой из них по методике в [2, 3] позволяет определять шумовые параметры для сравнительной оценки качества соответствующих катодов.

Закключение. Особенностью разработанного диагностического комплекса является автоматизированный процесс измерений шумовых характеристик термоэлектронных катодов с обеспечением необходимого уровня помехозащитности. Несмотря на то, что комплекс ориентирован на определенные катоды, предусмотрена возможность адаптации к катодам других типов и размеров; то же относится и к экспериментальным диодам, в которые помещаются катоды. В связи с этим комплекс, как модернизированное оборудование для научных исследований, предоставляет широкие возможности экспериментального изучения шумовых характеристик и формирования на их базе информативных шумовых параметров при диагностике различных термокатодов.

Л и т е р а т у р а

1. Tonnere J. C., Brion D., Palluel P., Shroff A. M. Evaluation of the work function distribution of impregnated cathodes // Appl. Sur. Sci. 1983. V. 16. P. 238—245.
2. Воробьев М. Д., Чирков М. Н., Чубаров В. В., Шитов Е. М. Шумовые методы оценки эмиссионной однородности термокатодов для электровакуумных СВЧ-приборов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2012. № 4. С. 40—45.
3. Воробьев М. Д., Чирков М. Н., Чубаров В. В., Юдаев Д. Н. Электрофлуктуационная диагностика эмитирующей поверхности термокатодов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2012. № 1. С. 38—45.
4. Ван дер Зил А. Шум. Источники, описание, измерение / Пер. с англ., под ред. А. К. Нарышкина. М.: Сов. радио, 1973.

Дата принятия 25.02.2015 г.