

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания к лабораторной работе № 3

САМАРА 1999

Составитель *Н.Д.Сёмкин*
УДК 621.397.001.24

Исследование люминесцентного преобразователя пылевых частиц: Метод. указания к лаб.работе №3 / Самар.гос.аэрокосм.ун-т; Сост.*Н.Д.Сёмкин*. Самара, 1999. 12 с.

В методических указаниях к лабораторной работе №3 по дисциплине "Проектирование первичных преобразователей бортовой научной аппаратуры" приводятся краткие теоретические сведения, описание принципиальной схемы и экспериментальной установки, порядок выполнения лабораторной работы с перечнем контрольных вопросов.

Предназначены для студентов радиотехнического факультета. Подготовлены на кафедре радиотехники.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва.

Рецензент В.М.Гречишников

Цель работы: ознакомиться с принципом действия, конструктивным исполнением, методикой проведения ударных экспериментов, техническими характеристиками.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Суспензии некоторых фосфоров в твердом диэлектрике могут быть возбуждены за счет механической энергии, привнесенной в вещество ударом как низкоскоростных, так и высокоскоростных частиц [1]. Для случая ударного нагружения экспериментально установлена зависимость вида:

$$U_m = K \frac{mW^2}{2}, \quad (1)$$

где m и W – масса и скорость частицы; U_m – амплитуда сигнала с фотоэлектронного умножителя, воспринимающего и преобразующего световую вспышку (возгорание люминофора) в электрический сигнал.

Коэффициент пропорциональности K при прочих равных условиях (материал частицы, суспензия фосфора) является функцией деформируемости соударяющихся тел. Эта зависимость может быть найдена из теории удара. При ударе соударяемые тела в результате действия ударной силы P деформируются и их центры масс сближаются на величину $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, где α_1, α_2 – деформации частицы и суспензии соответственно.

$$P = \frac{2}{3} R^2 \sqrt{\frac{1000\pi^3 \rho^3}{(v_1 + v_2)^3}} W^3, \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{4} R v_2 \sqrt{\frac{100\pi^2 \rho^2}{(v_1 + v_2)^2}} W^2, \quad (3)$$

где R – радиус частицы, ρ – плотность материала частицы, W – скорость частицы к моменту удара, v_1 и v_2 – коэффициенты, $\mu = \frac{4(1-\mu^2)}{E}$, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга.

Так как возбуждение фосфора происходит за счет работы, совершаемой при деформации слоя суспензии, то формулу (1) перепишем в виде $U_m = AP\alpha_2$.

Подставляя в последнее уравнение (2) и (3), получим

$$U_m = \frac{3}{5} A \pi R^3 \rho \frac{v_2}{v_1 + v_2} W^3, \quad U_m = \frac{5}{2} A \frac{v_2}{v_1 + v_2} \frac{mW^2}{2}. \quad (4)$$

При ударном механическом возбуждении световая вспышка должна возникать дважды: в момент возникновения деформации (сжатия суспензии) и при ее восстановлении. Соответственно, если время возгорания и

послесвечения фосфора меньше времени контакта при ударе, то выходной импульс должен иметь двугорбую форму.

Время контакта при ударе ($W < 100$ м/с) равно:

$$T = 0,735 \cdot R \sqrt{\frac{100\pi^2 (v_1 + v_2)^2 \rho^2}{\sqrt{2gh}}} \quad (5)$$

где h - высота падения частицы.

Два слоя суспензии желтого фосфора на синей основе (ZnS-100%; ZnO-2%; Cu= $3 \cdot 10^{-4}$ г, Mn= $8 \cdot 10^{-3}$ г; связующее - смола ЭП90В) имеют расчетное время возгорания и послесвечения, равное $4,22 \cdot 10^{-6}$ с.

В случае фосфоров со временем возгорания и послесвечения большими, чем время контакта при ударе, получаем импульс, близкий к экспоненциальному.

Рассмотрим корреляционные зависимости параметров сигнала и частицы при высокоскоростном взаимодействии ее с люминофором (пленкой ZnS, поверх которой нанесена защитная металлическая фольга). Толщины плёнок ZnS и защитной плёнки из меди составляют по 50 мкм.

При ударе частицы в защитную пленку происходит возбуждение и свечение люминофора, нанесенного на стеклянную мишень, с обратной стороны которой располагается приемник излучения (как правило, фотоэлектронный умножитель - ФЭУ). На выходе ФЭУ формируется электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна энергии частицы [2].

На основе теории ударных волн получим аналитическую зависимость сигнала как функции параметров частицы. Будем считать, что интенсивность свечения каждого элемента среды люминофора пропорциональна давлению P . Закон затухания ударной волны берем в форме:

$$P = P_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (6)$$

При выходе ударной волны на свободную поверхность люминофора площадь, охваченная ударной волной, высвечивается в течение короткого промежутка времени в процессе разгрузки. Таким образом, для интенсивности света можно записать:

$$J = KP_0 \left(\frac{R_0}{L} \right)^3 \quad (7)$$

где L - толщина люминофора, K - переводной коэффициент. В соответствии с теорией ударных волн возникающее при высокоскоростном соударении твердых тел давление на фронте волны равно:

$$P_0 = \frac{\rho_v W^2}{(1-x_v) \left(1 + a \sqrt{\frac{1-x_m}{1-x_v}} \right)^2}, \quad (8)$$

где x_v , x_m - сжимаемости вещества частицы и мишени соответственно.

Для определения давления необходимо знать уравнения ударных адиабат для материалов частицы и мишени. Пусть S - характерная площадь светящейся поверхности люминофора. Если L - толщина люминофора, то $S \sim L^2$. Считая интенсивность излучения люминофора однородной поверхностью S , для потока J_Φ световой энергии, падающей на рабочую поверхность фотоприемника, получим

$$J_\Phi = JS\Omega, \quad (9)$$

где Ω - телесный угол, под которым видна поверхность фотоприемника из точки на поверхности возбужденного люминофора.

Подставляя (7), (8) в (9), для амплитуды сигнала получим

$$J_{\Phi \text{ макс}} = G \frac{\rho_v W^2 R^3}{(1-x_v) \left(1 + a \sqrt{\frac{1-x_m}{1-x_v}} \right)^2}, \quad (10)$$

где $G = \frac{KS\Omega}{L}$ - коэффициент пропорциональности.

Считая величины x_v , x_m слабо зависящими от параметров пылевой частицы, а соотношения $\sqrt{(1-x_m)(1-x_v)}$, выражение (10) запишется в виде:

$$J_{\Phi \text{ макс}} = G' \frac{a^3 E_k}{(1+x_v)^2}, \quad (11)$$

где $G' = \frac{3KS\Omega}{4\pi(1-x_v)L^3}$ - коэффициент пропорциональности;

$E_k = \frac{mW^2}{2}$ - кинетическая энергия; $m = \frac{4}{3}\pi\rho_v R^3$ - масса частицы. Та-

ким образом, амплитуда сигнала пропорциональна кинетической энергии E_k частицы.

Чувствительность люминофоров к ударному воздействию $\left(\frac{\Delta U}{\Delta W}, \frac{\Delta U}{m} \right)$ зависит от состава исходного порошка. Например, современные люминофоры имеют чувствительность по массе частицы 10^{-13} г при $v > 10$ км/с, а в сочетании с конденсатором, нанесенным на поверхно-

сти защитной пленки люминофора, чувствительность возрастает в несколько раз. Например, если в ZnS ввести примеси в виде NH_4Cl , ZnCl_2 , MgCl_2 , NaCl , то полученные порошки люминофора обладают наибольшей чувствительностью к ударному воздействию.

Технология нанесения порошка люминофора: вжигание порошка в стеклянную мишень при температурах $700-1000^\circ\text{C}$ и осаждение суспензии порошка из раствора на основе клея и толуола при комнатной температуре.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема экспериментальной установки для исследования люминесцентных преобразователей пылевых частиц состоит из двух частей в соответствии с двумя моделями взаимодействия частицы с преградой - высокоскоростной и низкоскоростной.

Низкоскоростное взаимодействие частицы с преградой (люминесцентным преобразователем) моделируется на экспериментальном стенде, показанном на рис.1.

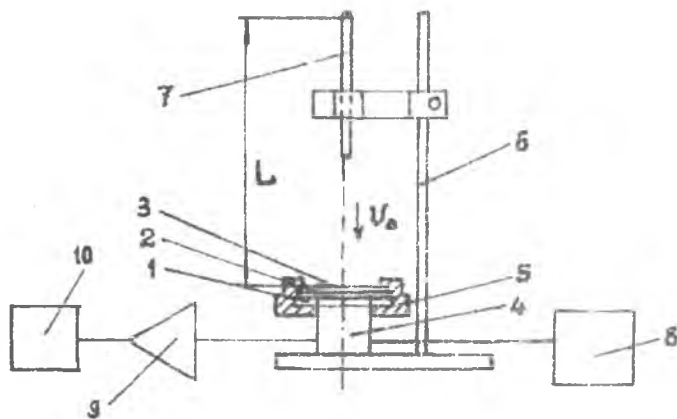


Рис.1. Схема экспериментального стенда в случае низкоскоростной модели

Мишенью служит люминесцентный преобразователь, состоящий из стеклянной подложки 1, люминесцентного слоя 2, чувствительного к удару, защитной пленки люминофора 3 (медной, алюминиевой и т.д.), фотоэлектронного умножителя 4, светонепроницаемой оправы 5. Сбросовое

устройство состоит из держателя 6, стеклянной трубки 7 и частицы в виде стального шарика диаметром 1...3 мм. Шарик сбрасывается через стеклянную трубку с высоты =5...20 см. Потенциальная энергия частицы равна mgh , где m - масса шарика, g - ускорение свободного падения, h - высота, с которой сбрасывается шарик. Фотоэлектронный умножитель 4 соединен с источником питания 8, с усилителем 9, осциллографом 10. Экспериментальная установка предназначена для исследования характеристики люминесцентного преобразователя $U_m=f(E_u)$, где E_u - кинетическая энергия частицы.

$E_u = \frac{mW^2}{2}$; так, при $m = 3 \cdot 10^{-5}$ кг ($d=2$ мм при $\rho=8$ г/см³) и $W=1,44$ м/с (при $h=10$ см) $E_u=6 \cdot 10^{-5}$ Дж, что соответствует в случае высокоскоростного удара параметрам частицы: $m \approx 10^{-12}$ кг, $W=10$ м/с.

Высокоскоростное взаимодействие частицы с люминесцентным преобразователем моделируется на экспериментальном стенде, показанном на рис.2.

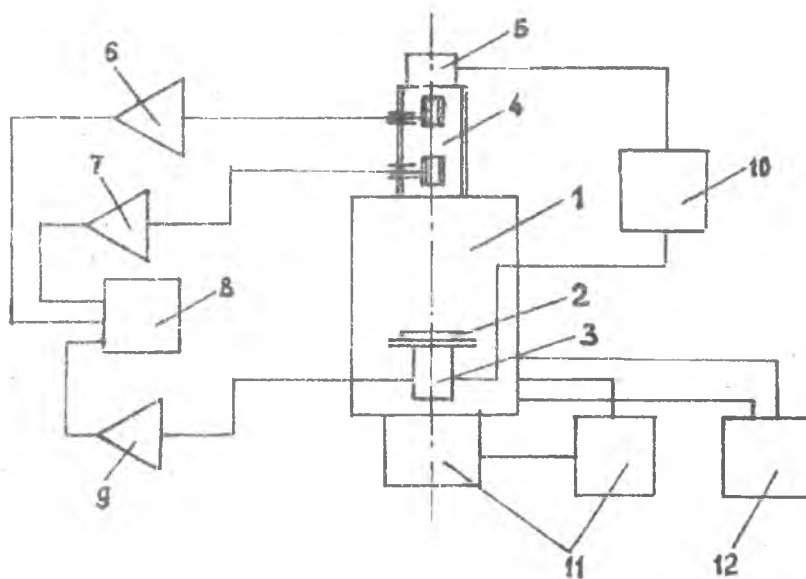


Рис.2. Схема экспериментального стенда в случае высокоскоростной модели

Экспериментальный стенд содержит вакуумную камеру 1, люминесцентный стенд содержит вакуумную камеру 1, люминесцентный преобразователь 2, фотоэлектронный умножитель 3, источник частиц 4 и 5, зарядочувствительные усилители 6 и 7, осциллограф 8, усилитель 9, источники питания 10, вакуумные насосы 11, вакууммер 12. Стенд функционирует следующим образом: частицы, ускоренные в инжекторе 5, пролетают через цилиндры Фарадея, установленные вдоль оси трубки 4. Наведенные на них заряды от частицы (частица заряжена) усиливаются усилителями 6 и 7. С усилителя 6 импульсом запускается запоминающий осциллограф 8, а импульс заряда от второго цилиндра Фарадея, усиленный усилителем 7, запоминается на втором канале осциллографа. Таким образом, происходит измерение скорости частицы. Далее частица, соударяясь с защитной пленкой люминесцентного преобразователя 2, вызывает свечение люминофора (вспышку света), которая преобразуется с помощью ФЭУ в электрический сигнал. Амплитуда его пропорциональна энергии частицы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Принцип работы люминесцентного преобразователя пылевых частиц.
2. Измеряемые параметры.
3. Назначение, состав экспериментальных установок.
4. Правила эксплуатации вакуумного оборудования.

ЗАДАНИЯ

1. Ознакомиться с явлением механического возбуждения люминофоров.
2. Изучить работу экспериментальных установок.
3. Изучить методику проведения экспериментов.
4. Исследовать характеристики люминесцентного преобразователя в режиме упругого соударения (единицы м/с) и высокоскоростного соударения (сотни м/с и более), а также корреляционные зависимости выходного сигнала от параметров частицы.
5. Исследовать влияние конструктивных параметров преобразователя на чувствительность к ударному воздействию

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследование зависимости амплитудного значения сигнала с ФЭУ люминесцентного преобразователя от параметров частицы в диапазоне низких скоростей. Работа выполняется на экспериментальной установке, показанной на рис. 1.

Устройство сброса 7 устанавливается на фиксированном расстоянии от поверхности преобразователя на расстоянии $R=5, 10, 15, 20, 25$ см. Для каждой точки ($R_{1,2,3}$) необходимо повторить измерение несколько раз.

В качестве частицы целесообразно использовать стальной шарик диаметром 1-2 мм. В случае насыщения ФЭУ необходимо уменьшить коэффициент усиления посредством уменьшения напряжения питания 8. Расстояние h измеряется от шарика до поверхности преобразователя. Скорость частицы рассчитывается как

$$W = \sqrt{2gh} = \sqrt{20 \cdot 0,1} = 1,44 \text{ м/с (при } h = 0,1 \text{ м)};$$

масса шарика равна $m = \frac{\pi \rho D^3}{6} = \frac{\pi \cdot 7,8 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{6} \approx 1,9 \cdot 10^{-3}$ г при $d=0,2$ см, $m=2,1$ кг

Кинетическая энергия частицы $E_c = \frac{mW^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,9}{2} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ Дж.

При ударе частицы в защитную пленку преобразователя (фольга с $h=50$) импульс с ФЭУ 4 запоминается осциллографом. Таким образом, снимается характеристика. Результаты экспериментов необходимо сравнить с формулой (4). Разброс значений характеристики $U_m=f(E_u)$ зависит от технологии нанесения люминофора, размеров частиц порошка ZnS, а также от статистической природы свечения фосфоров при механическом воздействии. Необходимо исследовать характеристику $\tau_u=f(W)$, где τ - время нарастания переднего фронта импульса с ФЭУ.

2. Исследование зависимости $U_m=f(E_u)$ в диапазоне высоких скоростей.

Для этого используется экспериментальная установка, изображенная на рис.2.

Здесь частицы, заряженные в инжекторе 5, хаотически вылетают в область трубки 4. Размеры частицы, как правило, составляют 0,1÷1мкм, а их скорости находятся в пределах 1÷5км/с.

Скорости частицы находятся как $W = \frac{L}{t}$, где L - расстояние между двумя цилиндрами и поверхностью преобразователя. Время t пролёта частицы измеряется с помощью осциллографа 8. Каждому измеренному импульсу с ФЭУ должно соответствовать измеренное время, отсчитываемое от нижнего цилиндра Фарадея до чувствительной поверхности плёнки люминофора (до переднего фронта импульса U_m с ФЭУ).

Измерение воздействий производится в количестве $n=50 \div 80$, после чего выбираются значения измеренных импульсов U_m с одинаковыми или близкими скоростями. Таких значений должно быть, по крайней мере, $10 \div 15$. Тогда имеем ряд значений с одинаковыми скоростями $(10 \div 15)W_1, (10 \div 15)W_2, (10 \div 15)W_3, \dots, (10 \div 15)W_m$. В результате обработки измерений каждой группе значений будет соответствовать одно среднестатистиче-

ское значение $\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \tilde{W}_3, \dots, \tilde{W}_m$. Далее строится характеристика $\frac{E}{m} = f(W^2)$, где m - масса частиц, заряженных в инжектор, заранее известна (разброс частиц по размерам задается).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Для построения зависимостей $U_m = f(E_{in})$ и $\tau_m = f(W)$ в диапазоне низких скоростей необходимо найти среднее арифметическое результатов путем обработки n измерений:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

найти среднеквадратическое отклонение результатов наблюдений:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n-1}},$$

где x_i - результат наблюдений;

\bar{A} - среднее арифметическое результатов наблюдений;

n - число результатов наблюдений;

S_x - оценка среднего квадратического отклонения результатов наблюдений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Результаты измерений, расчеты, графики, осциллограммы, погрешности измерений.
5. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить принцип работы люминесцентного преобразователя пылевых частиц.
2. Что такое время возгорания и послесвечения люминофора?
3. Чем объяснить значительный разброс экспериментальных данных?
4. Как влияют различные добавки в фосфор на чувствительность люминофоров к механическому воздействию?
5. Объяснить влияние скорости частицы на длительность переднего фронта импульса в диапазоне низких скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семкин Н.Д. Анализ методов регистрации высокоскоростных пылевых частиц и их структурный синтез. Деп. в ВИНТИ. - N8566-B87, 1987.-37с.
2. Бкимова Н. Ф. и др. К вопросу механического возбуждения люминесцентных панелей // М.:Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. Вып.12, 1966, с.1075.

Составитель Семкин Николай Данилович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания
к лабораторной работе №3

Редактор Н.С.Куприянова
Техн. редактор Г.А.Усачева
Корректор Т.И.Щелокова

Подписано в печать 10.06.99 г. Формат 60×84/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл.п.л. 0,69. Усл.кр.-отт. 0,81. Уч.-изд.л. 0,75. Тираж 50 экз.

Заказ 80.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева,
443086 г Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического университета
имени академика С.П.Королева,
443001 г.Самара, ул.Молодогвардейская, 151.