

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ФОТОСЛОЯ В ОТПАЯННЫХ ВИДИКОНАХ

Параметры фотопроводящих слоев в готовых видиконах со временем изменяются. Причиной этих изменений могут быть следующие факторы: непрерывная бомбардировка мишени электронами первичного пучка, длительное освещение, состоящие вакуума и т. д. Для установления характера влияния этих причин необходим контроль параметров в процессе работы прибора, а также необходимо знать величину сопротивления фотослоя.

Несмотря на существование многочисленных методов измерения сопротивления фотопроводящих слоев при помощи электронного пучка, в настоящее время еще нет простого способа, позволяющего с достаточной точностью определить сопротивление высокоомной мишени с коммутацией пучком быстрых электронов.

Известные методы определения сопротивления в отпаянных приборах [1—3] пригодны лишь для видиконов, работающих в режиме медленных электронов. Эти методы непригодны для определения свойств мишеней видиконов, работающих в режиме быстрых электронов, так как эти свойства зависят от величины приложенного напряжения, т. е. от режима работы.

В настоящей работе рассматривается способ, при помощи которого можно измерить изменение сопротивления мишеней отпаянных видиконов, который основан на использовании зависимости тока через фотослой от напряжения на сигнальной пластине. Данный метод пригоден для случая положительной зарядки фоточувствительного слоя и для случая отрицательной зарядки.

Теоретическое обоснование метода

Напряжение на сигнальной пластине определяется выражением.

$$U_{\text{сп}} = U_0 + U_{\text{сл}}, \quad (1)$$

где U_0 — падение напряжения на сопротивлении первичного пучка R_0 ;

$U_{\text{сл}}$ — падение напряжения на фотослое.

Пусть величина падения напряжения на сопротивлении первичного пучка R_0

$$U_0 = U_{\text{сн}} - \frac{1}{\chi} i_0 \frac{dU_{\text{сн}}}{di_{\text{сл}}}, \quad (2)$$

где i_0 — ток первичного пучка;

χ — некоторый коэффициент при фиксированном напряжении на сигнальной пластине;

$i_{\text{сл}}$ — ток через фотослой.

Продифференцировав выражение (1) по переменной $i_{\text{сл}}$ и подставив в выражение (2), имеем

$$U_0 = U_{\text{сн}} - \frac{1}{\chi} i_0 \frac{dU_0}{di_{\text{сл}}} - \frac{1}{\chi} i_0 R_{\text{сл}} \quad (3)$$

$$\left(R_{\text{сл}} = \frac{dU_{\text{сл}}}{di_{\text{сл}}} \right).$$

После некоторых преобразований (3) получим

$$\frac{dU_0}{di_{\text{сл}}} + \chi \frac{U_0}{i_0} = \chi \frac{U_{\text{сн}}}{i_0} - R_{\text{сл}}. \quad (4)$$

В этом выражении χ/i , $\chi U_{\text{сн}}/i_0$ и $R_{\text{сл}}$ при данном фиксированном напряжении на сигнальной пластине являются постоянными, поэтому решение полученного дифференциального уравнения первого порядка можно записать в следующем виде:

$$U_0 = \left[\left(U_{\text{сн}} - \frac{1}{\chi} i_0 R_{\text{сл}} \right) e^{\chi \frac{i_{\text{сл}}}{i_0}} + C \right] e^{-\chi \frac{i_{\text{сл}}}{i_0}}, \quad (5)$$

где C — постоянная интегрирования, которая может быть определена из условия

$$(i_{\text{сл}} = 0; U_0 = U_{\text{сн}}) \quad C = \frac{1}{\chi} i_0 R_{\text{сл}}.$$

С учетом C выражение (5) примет следующий вид:

$$U_0 = \left[\left(U_{\text{сн}} - \frac{1}{\chi} i_0 R_{\text{сл}} \right) e^{\chi \frac{i_{\text{сл}}}{i_0}} + \frac{1}{\chi} i_0 R_{\text{сл}} \right] e^{-\chi \frac{i_{\text{сл}}}{i_0}}, \quad (6)$$

Откуда

$$R_{\text{сл}} = \frac{U_{\text{сн}} - U_0}{i_0} \chi \frac{1}{1 - e^{-\chi \frac{i_{\text{сл}}}{i_0}}}. \quad (7)$$

Для того, чтобы из выражения (7) исключить переменную величину U_0 , используем выражение (2). В результате преобразования получим

$$R_{сл} = \frac{dU_{сн}}{di_{сл}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-x} \frac{i_{сл}}{i_0}} \quad (8)$$

Постоянная величина x при данном напряжении на сигнальной пластине может быть выражена через величины, которые легко получить экспериментальным путем. Для этого используем выражения (1) и (2), а также условие

$$\frac{dU_{сн}}{di_{сл}} = R_0 + R_{сл}, \quad (9)$$

где R_0 — сопротивление вакуумного промежутка и может быть выражено через падение напряжения на этом промежутке при постоянном токе первичного пучка следующим образом:

$$R_0 = \frac{U_0}{i_0}. \quad (10)$$

При совместном решении уравнений (2) и (9), а также (1) и (2) получим

$$U_{сл} = \frac{1}{x} i_0 \cdot \frac{dU_{сн}}{di_{сл}} \quad (11)$$

и

$$U_{сл} = i_{сл} \frac{dU_{сн}}{di_{сл}} - i_{сл} \frac{U_{сл}}{i_0} + \frac{1}{x} i_{сл} \frac{dU_{сн}}{di_{сл}}. \quad (12)$$

Отсюда получим значение постоянной x :

$$x = \left(\frac{i_0}{i_{сл}} - 1 \right) \frac{1}{1 - \frac{U_{сн}}{i_0} \cdot \frac{di_{сл}}{dU_{сн}}}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (8), получим выражение для сопротивления $R_{сл}$:

$$R_{сл} = \left| \frac{dU_{сн}}{di_{сл}} \cdot \frac{1}{1 - e^\delta} \right|, \quad (14)$$

где

$$\delta = \left(1 - \frac{i_{сл}}{i_0} \right) \frac{1}{\frac{U_{сн}}{i_0} \cdot \frac{di_{сл}}{dU_{сн}} - 1}.$$

Имея экспериментальную зависимость тока через фотопроводящий слой от напряжения на сигнальной пластине $i_{\text{сл}} = (fU_{\text{сн}})$, а также используя выражение (14), можно определить сопротивление элемента фотопроводящего слоя мишени во всей области изменения напряжения на сигнальной пластине, за исключением точек, где первая производная $\frac{dU_{\text{сн}}}{di_{\text{сл}}} = 0$

$$\text{и } \frac{dU_{\text{сн}}}{di_{\text{сл}}} = \infty.$$

При $\frac{dU_{\text{сн}}}{di_{\text{сл}}} \rightarrow 0$ можно при вычислении пользоваться следующим приближенным выражением:

$$R_{\text{сл}} = \left| \left(\frac{1}{i_0 - i_{\text{сл}}} \right) \left(i_0 \frac{dU_{\text{сн}}}{di_{\text{сл}}} - U_{\text{сн}} \right) \right|. \quad (15)$$

При использовании выражений (14) и (15) для определения сопротивления элемента фотопроводящего слоя мишени по экспериментальной зависимости необходимо в данных выражениях перейти от дифференциалов к конечным приращениям. Тогда выражения (14) и (15) можно записать в виде

$$R_{\text{сл}} = \left| \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \cdot \frac{1}{1 - e^{\delta}} \right|, \quad \delta = \left(1 - \frac{i_{\text{сл}}}{i_0} \right) \frac{1}{\frac{U_{\text{сн}}}{i_0} \cdot \frac{\Delta i_{\text{сл}}}{\Delta U_{\text{сн}}} - 1} \quad (16)$$

$$\text{при } \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \neq 0 \text{ и } \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \neq \infty;$$

$$R_{\text{сл}} = \left| \left(\frac{1}{i_0 - i_{\text{сл}}} \right) \left(i_0 \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta i_{\text{сл}}} - U_{\text{сн}} \right) \right| \text{ при } \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \rightarrow 0. \quad (17)$$

Следует заметить, что при использовании выражений (16) и (17) для определения сопротивления элемента фотопроводящего слоя мишени необходимо учитывать знак при $i_{\text{сл}}$ и $\Delta i_{\text{сл}}$, обусловленный направлением и величиной тока через фотопроводящий слой.

В случае отрицательной зарядки слоя (режим медленных электронов) направление тока пучка i_0 и тока через фотопроводящий слой $i_{\text{сл}}$ имеет одно и то же направление, а в случае положительной зарядки (режим быстрых электронов) направление тока первичного пучка и тока через фотопроводящий слой противоположное. Поэтому при определении сопротивления элемента разложения фотопроводящего слоя для отрицательной части характеристики величина тока через фотопроводящий слой

берется со знаком «минус», а для верхней части характеристики — со знаком «плюс».

Имея характеристику тока через фотопроводящий слой от напряжения на сигнальной пластине и используя выражения (16) и (17), можно определить, как изменяется сопротивление фотопроводящего слоя с изменением напряжения, приложенного к фотопроводящему слою, а также кинетику изменения потенциала поверхности элемента разложения фотопроводящего слоя при изменении освещенности слоя и напряжения на сигнальной пластине.

Если в видиконе имеется коллекторная сетка, то выражения (16) и (17) примут следующий вид:

$$R_{\text{сл}} = \left| \frac{\Delta U_{\text{сп}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \cdot \frac{1}{1 - e^{\delta}} \right|, \quad \delta = \left(1 - \frac{i_{\text{сл}}}{qi_0} \right) \frac{1}{\frac{U_{\text{сп}}}{qi_0} \cdot \frac{\Delta i_{\text{сл}}}{\Delta U_{\text{сп}}} - 1} \quad (18)$$

$$\text{при } \frac{\Delta U_{\text{сп}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \neq 0 \text{ и } \frac{U_{\text{сп}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \neq \infty;$$

$$R_{\text{сл}} = \left| \left(\frac{1}{qi_0 - i_{\text{сл}}} \right) \left(qi_0 \frac{\Delta U_{\text{сл}}}{\Delta i_{\text{сл}}} - U_{\text{сп}} \right) \right| \text{ при } \frac{\Delta U_{\text{сп}}}{\Delta i_{\text{сл}}} \rightarrow 0, \quad (19)$$

где q — коэффициент прозрачности коллекторной сетки видикона для электронов первичного пучка, который для нормально падающего на мишень электронного пучка можно считать равным коэффициенту прозрачности для светового пучка и может быть найден как отношение незаполненной площади сетки к общей площади

$$q = \frac{S_2 - S_1}{S_2}$$

где S_2 — площадь сетки; S_1 — площадь заполнения.

При определении кинетики изменения потенциала поверхности элемента разложения фотопроводящего слоя мишени необходимо пользоваться следующей зависимостью:

$$U_{\text{м}} = U_{\text{сп}} + R_{\text{сл}} i_{\text{сл}}. \quad (20)$$

В случае положительной зарядки слоя ($\sigma > 1$) и в случае отри-

$$U_{\text{м}} = U_{\text{сп}} - R_{\text{сл}} i_{\text{сл}}. \quad (21)$$

цательной зарядки фотопроводящего слоя ($\sigma < 1$).

При исследовании потенциального рельефа необходимо наряду с выражениями (20) и (21) использовать следующее соотношение:

$$\Delta U = U_{\text{м.т}} - U_{\text{м.св}}, \quad (22)$$

где ΔU — потенциал светлого участка мишени по отношению к темному, который характеризует глубину потенциального рельефа;

$U_{\text{м.т.}}$ — потенциал темного участка мишени;

$U_{\text{м.св.}}$ — потенциал светлого участка мишени.

Используя зависимость тока через фотопроводящий слой от напряжения на сигнальной пластине и применяя выражения (18), (23), можно определить сопротивление элемента разложения фотопроводящего слоя, потенциал поверхности мишени, а также глубину потенциального рельефа.

Оценка погрешности метода

При нахождении величины сопротивления фотослоя рассмотренным способом точность измерений не превышает точности, даваемой другими известными способами, так как и в этом случае в качестве одного из контактов используется электронный пучок, контактными свойствами которого определяются основные погрешности измерений.

Однако при определении изменения сопротивления, кинетики изменения потенциала поверхности элемента разложения фотослоя и глубины потенциального рельефа погрешность может быть значительно снижена.

Как видно из выражения (14), при определенном режиме работы видикона сопротивление элемента разложения фотопроводящего слоя мишени определяется током через фотопроводящий слой, напряжением на сигнальной пластине и током первичного пучка:

$$R_{\text{сл}} = f(i_0, i_{\text{сл}}, U_{\text{сп}}). \quad (23)$$

Так как эти величины определяются экспериментальным путем, то им присущи систематические и случайные ошибки, которые обозначим через di_0 , $di_{\text{сл}}$, $dU_{\text{сп}}$.

С учетом ошибок выражение (23) можно записать следующим образом:

$$R_{\text{сл}} + dR_{\text{сл}} = f(i_0 + di_0, i_{\text{сл}} + di_{\text{сл}}, U_{\text{сп}} + dU_{\text{сп}}), \quad (24)$$

где $dR_{\text{сл}}$ — частное значение приращения сопротивления фотослоя $R_{\text{сл}}$, соответствующее приращениям di_0 , $di_{\text{сл}}$, $dU_{\text{сп}}$.

Такое допущение является приемлемым для нашего случая, так как $R_{\text{сл}} = f(i_0, i_{\text{сл}}, U_{\text{сп}})$ — непрерывная функция [4].

Разложив правую часть выражения в ряд Тейлора и пренебрегая членами выше первого порядка, получаем

$$R_{\text{сл}} + dR_{\text{сл}} = f(i_0, i_{\text{сл}}, U_{\text{сп}}) + \frac{\partial f}{\partial i_0} di_0 + \frac{\partial f}{\partial i_{\text{сл}}} di_{\text{сл}} + \frac{\partial f}{\partial U_{\text{сп}}} dU_{\text{сп}}. \quad (25)$$

Отсюда, принимая во внимание выражение (23):

$$dR_{\text{сл}} = \frac{\partial f}{\partial i_{\text{сл}}} di_{\text{сл}} + \frac{\partial f}{\partial i_0} di_0 + \frac{\partial f}{\partial U_{\text{сп}}} dU_{\text{сп}}. \quad (26)$$

Таким образом, ошибка от функции трех переменных (23) равна полному дифференциалу этой функции. Подставляя вместо дифференциалов значения истинных ошибок и обозначая значения частных производных $\frac{\partial f}{\partial i_0}$, $\frac{\partial f}{\partial i_{сл}}$, $\frac{\partial f}{\partial U_{сн}}$ через f'_0 , $f'_{сл}$, $f'_{сн}$ получим

$$\frac{\Delta R_{сл}}{R_{сл}} = (\Delta i_{сл} f'_{сл} + \Delta i_0 f'_0 + \Delta U_{сн} f'_{сн}) \frac{1}{R_{сл}}. \quad (27)$$

Используя выражение (27), можно оценить ту максимальную погрешность при определении относительного изменения сопротивления элемента разложения, которая получается при измерении тока через фотослой, напряжения на сигнальной пластине и тока первичного пучка с точностью 10%. Величина относительной погрешности при этом не превышает 15%.

ВЫВОДЫ

1. В полученной формуле величина сопротивления фотослоя целиком определяется данными, которые можно извлечь из экспериментальной кривой тока через фотослой от напряжения на сигнальной пластине.

2. Данный метод, на наш взгляд, наиболее целесообразен для определения относительного изменения величины сопротивления фотослоя, ошибка при этом составляет не более 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гернет Э. М. Измерение параметров фотопроводящего слоя в готовых видиконах. «Изв. вузов. Приборостроение», 1960, т. 3, № 6, с. 15—20.
2. Глыбин В. С. Исследование работы видикона с пучком быстрых электронов. Автореф. канд. дис. Л., 1966. 21 с.
3. Гершберг А. Е., Михайлов-Теплов Н. Н. Методы измерения потенциала мишени видикона. «Электронная техника. Серия № 4», 1968, № 1, с. 17—28.
4. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений. М., «Мир», 1968. 462 с.