

УДК 681.723 : 621.383 : 681.7.015.2

КАЛИБРОВКА ФОТОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА В СОСТАВЕ ИК-МИКРОСКОПА

Г. Л. Курышев, И. В. Мжельский, А. Е. Настовьяк, В. Г. Половинкин

Учреждение Российской академии наук

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

E-mail: pvg@isp.nsc.ru

Работа инфракрасного фотоприёмного устройства (ФПУ) в составе ИК-микроскопа имеет ряд особенностей, не позволяющих применить известные для тепловизионного прибора методы калибровки. Предлагается дифференциальный метод калибровки, дающий возможность учесть как нелинейность передаточной характеристики узла чтения ФПУ и электронного тракта, так и влияние изменения потока фонового излучения.

Ключевые слова: инфракрасный микроскоп, калибровка.

Введение. Развитие тепловизионной микроскопии (или ИК-микроскопии) расширяет области применения как обычной микроскопии видимого диапазона, так и тепловидения. Специфической особенностью ИК-микроскопии (как и тепловидения) является возможность наблюдения объектов не только в отражённом или прошедшем свете, но и регистрации их собственного теплового излучения. Особую проблему в последнем случае составляет перевод значений измеренного сигнала в значения температуры наблюдаемого объекта, т. е. определение распределения температуры изучаемого объекта. Сложность обусловлена двумя основными факторами:

- 1) нелинейностью и неоднородностью передаточных характеристик элементов фотоприёмного устройства (ФПУ),
- 2) значительным влиянием на регистрируемый сигнал фонового излучения и его изменения, вызванного изменением температуры окружающей среды.

Целью предлагаемой работы является создание методов определения нелинейности передаточных характеристик элементов ФПУ и коррекции влияния фонового излучения для ИК-микроскопа ТИРМ-1 (разработка и изготовление Института физики полупроводников СО РАН).

Конструкция ИК-микроскопа ТИРМ-1 описана в работе [1] и показана на рис. 1. Используемое ФПУ, аналогичное ФПУ тепловизионного прибора ТКВр-ИФП «СВИТ» [2], представляет собой матрицу МДП-структур размера 128×128 элементов с шагом 50 мкм, соединённую методом flip-chip с кремниевым мультиплексором. ФПУ помещено в вакуумированный заливной криостат, заполняемый жидким азотом. Входное окно криостата выполнено из лейкосапфира, просветлённого на рабочий диапазон длин волн 2,6–3,05 мкм. Для уменьшения фоновой нагрузки на ФПУ применено экранирующее сферическое зеркало.

Прибор комплектуется сменными объективами ТМ8× и ТМ20× (разработка и изготовление Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск). Использование таких объективов даёт возможность изменять пространственное разрешение от 3 до 8 мкм. Для определения величины сигнала от фонового потока между объективом и экранирующим зеркалом расположены две электрически управляемые шторки с разными излучательными способностями (зеркальная и чёрная шлифованная поверхности). Электронная схема управления и программное обеспечение

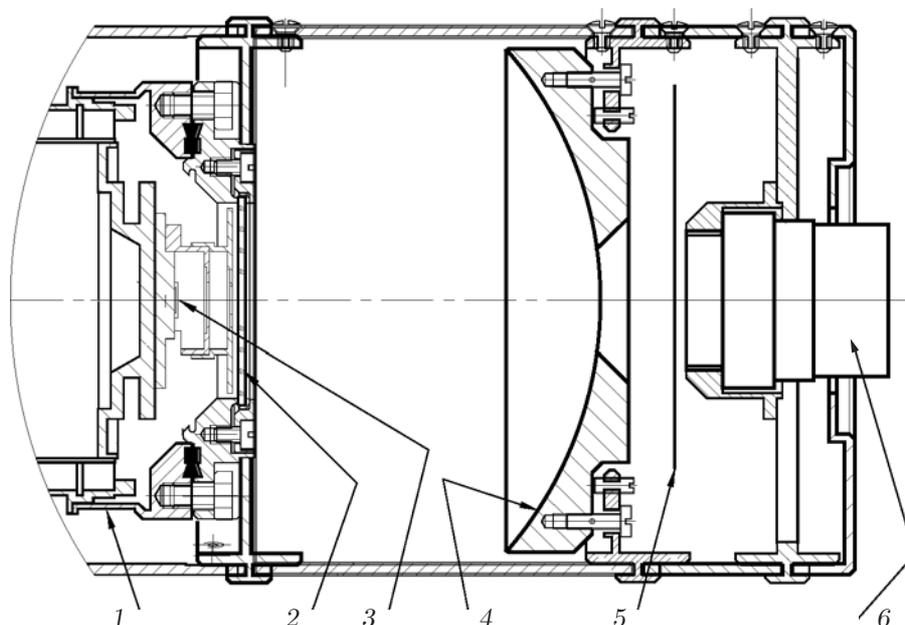


Рис. 1. Конструкция ИК-микроскопа: 1 — корпус заливного криостата, 2 — входное окно, 3 — ФПУ, 4 — экранирующее сферическое зеркало, 5 — управляемые шторки, 6 — сменный объектив

позволяют изменять время накопления (время экспозиции) ФПУ на величину, кратную минимальному времени накопления: $t_{a_{\min}} = 10$ мс.

Определение передаточной характеристики. Нелинейность передаточных характеристик элементов ФПУ может быть вызвана разными причинами: принципиальными особенностями организации ФПУ и его технической реализации. Нелинейность приводит также к невозможности простым вычитанием выделить из полного сигнала составляющую, обусловленную фоновым излучением.

Решить указанные проблемы можно с помощью перевода индивидуальных сигналов элементов в некоторую универсальную характеристику, которую можно считать пропорциональной потоку фотонов. Для этого следует иметь эталонный источник с известным потоком фотонов, например абсолютно чёрное тело (АЧТ). Однако для определения потока фотонов, регистрируемых ФПУ, необходимо знать спектральные характеристики элементов.

В данной работе предлагается дифференциальный метод нахождения связи сигнала с интенсивностью потока фотонов. Если измерить изменение фотосигнала δS при модуляции потока фотонов на фиксированную величину δI для разных значений основного потока и, следовательно, сигнала S , то получим значения величин $\delta S = F(S)\delta I$, или в дифференциальной форме $dS/dI = F(S)$. Это уравнение можно обратить интегрированием:

$$I(S) - I(S_0) = \int_{S_0}^S dS/F(S). \quad (1)$$

В результате получим функцию $I(S)$, преобразующую значение сигнала в величину, пропорциональную интенсивности потока фотонов (функцию интенсивности).

Для модуляции потока фотонов использовались шторки микроскопа с различной излучающей способностью. Так как шторки расположены на значительном (~ 100 мм) расстоянии от ФПУ и видны для ФПУ под малым телесным углом, то различие потоков излучения от

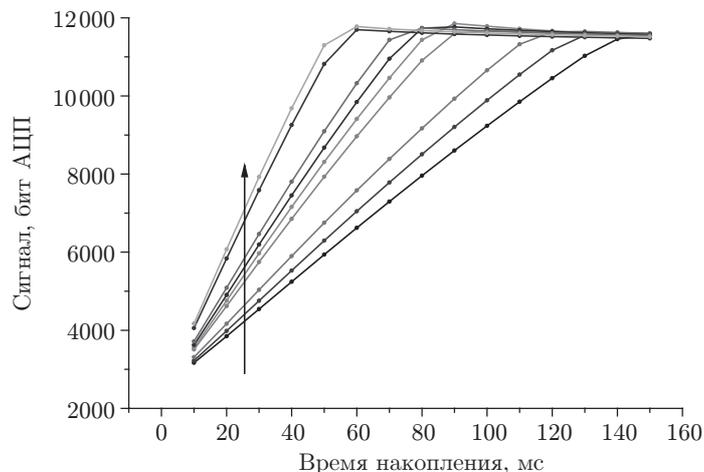


Рис. 2. Зависимости сигнала от времени накопления при изменении температуры корпуса прибора от 12 до 30 °С (стрелка показывает направление увеличения температуры)

них в первом приближении можно считать малым. Вариация основного (или опорного) потока производилась двумя способами: изменением времени накопления и изменением температуры корпуса. На рис. 2 представлены зависимости сигнала от времени накопления среднего по всем элементам ФПУ при закрытой тёмной шторке (ТШ) и различных температурах корпуса прибора.

Зависимость нормированной разности сигналов тёмной и зеркальной шторок ($S_d - S_m$) от среднего сигнала $0,5(S_d + S_m)$ приведена на рис. 3. Нормировка проводилась делением на время накопления и на величину разности при сигнале, равном 7000 (середина диапазона изменения сигнала). Такой нормировкой учитывалось изменение разности потоков от шторок при изменении их температуры. Отметим характерные особенности полученных зависимостей:

- данные при разных временах накопления и разных температурах корпуса укладываются в одну зависимость;
- понижение разности при малых сигналах обусловлено понижением эффективности ввода малых зарядов в устройство ввода кремниевого мультиплексора;

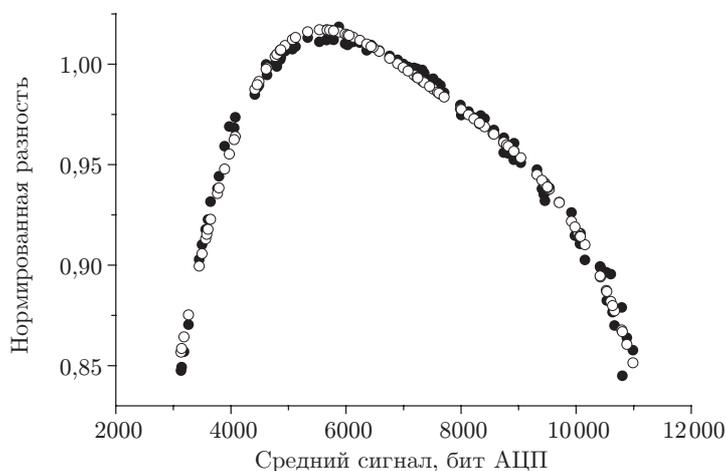


Рис. 3. Нормированная разность сигналов тёмной и зеркальной шторок (тёмные точки) и результат аппроксимации полиномом четвёртой степени (светлые кружки)

— понижение разности при больших сигналах вызвано приближением МДП-структуры к насыщению;

— примерно линейное понижение в средней части графика есть следствие нелинейности передаточной характеристики выходного транзистора мультиплексора.

Для определения интересующей нас функции интенсивности по формуле (1) следует найти некоторое аппроксимирующее выражение для $F(S) = dS/dI$. Модельные расчёты возможного вида представленных зависимостей предсказывают их экспоненциальное поведение на краях диапазона. Однако использование экспонент в аппроксимирующем выражении для $F(S)$ приводит к сложной формуле для $I(S)$, вычисление которой в реальном времени для всех элементов ФПУ практически невозможно. Поэтому мы пошли другим путём — применили аппроксимацию полиномом для функции $1/F(S)$. Достаточная точность аппроксимации достигается при использовании полинома четвёртой степени. В этом случае требуемая зависимость интенсивности от сигнала $I(S)$ — полином пятой степени.

Используемый способ определения функции интенсивности $I(S)$ даёт два свободных параметра: член, возникающий при интегрировании в (1), и масштабный множитель. Эти параметры были доопределены из следующих условий:

1) зависимость интенсивности от времени накопления должна экстраполироваться к нулевому значению при времени накопления, равном 0;

2) наклон зависимости $I(S)$ примерно равен 1, а точнее, $I(S_2) - I(S_1) = S_2 - S_1$, где $S_1 = \min(S) + 0,1\Delta$, $S_2 = \max(S) - 0,1\Delta$, $\Delta = \max(S) - \min(S)$.

Коррекция влияния фонового излучения. Полученная функция интенсивности позволяет провести корректное вычитание фонового сигнала. Рис. 4 иллюстрирует влияние изменения интенсивности фонового излучения (измеряемого при закрытой тёмной шторке), вызванного изменением температуры корпуса прибора, на интенсивность, регистрируемую при исследовании объекта, имеющего постоянную температуру. Хорошо видны линейные зависимости этих двух величин и примерное постоянство угла наклона.

Среднее значение коэффициентов указанных зависимостей 0,913 отличается от 1 в меньшую сторону. Это объясняется тем, что при закрытой шторке всё поле зрения ФПУ занято «фоновыми» объектами (имеющими температуру корпуса), а при открытой шторке часть поля зрения занята видимым через объектив изучаемым объектом и излучение

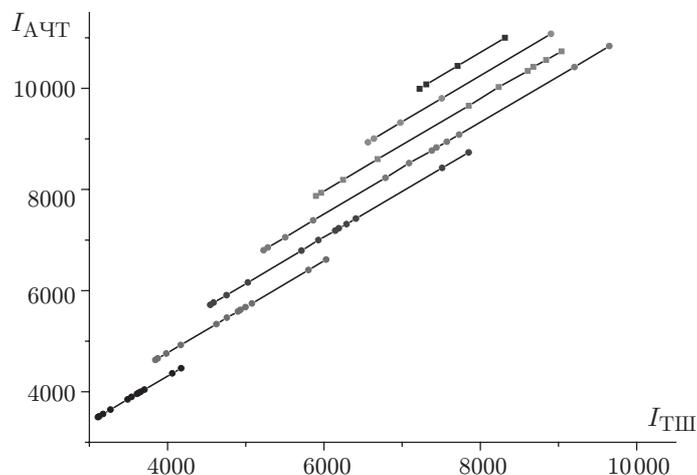


Рис. 4. Зависимости функции интенсивности при открытой шторке $I_{\text{АЧТ}}$ от функции интенсивности при закрытой тёмной шторке $I_{\text{ТШ}}$ для разных времён накопления: $t_a = 10\text{--}70$ мс

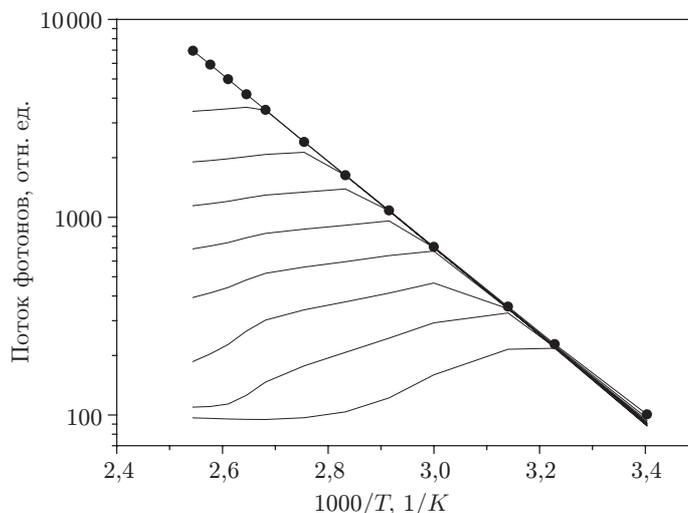


Рис. 5. Зависимости нормированных величин от обратной температуры для разных времён накопления. Отклонение от прямой линии соответствует выходу ФПУ на насыщение

этой части не зависит от температуры корпуса. Следовательно, отличие коэффициента от 1 определяется соотношением эффективных площадей объектива и «всех остальных узлов». Зная коэффициент влияния интенсивности фонового излучения, можно такое влияние исключить простым вычитанием. Попытка описать подобным образом коэффициент связи для сигналов (без использования функции интенсивности) приводит к существенной зависимости определяемых коэффициентов от времени накопления.

Определение эквивалентной температуры. Итак, получив свободное от влияния фонового излучения значение функции интенсивности, мы можем перевести его в значение эквивалентной температуры АЧТ. Для реально используемых диапазонов температур 300–500 К и длин волн приёмника 2,5–3,1 мкм зависимость числа фотонов от температуры с хорошей точностью описывается выражением $I_{ph} = I_1 \exp(-E_{eff}/kT)$. На рис. 5 приведены зависимости регистрируемых значений интенсивности, нормированных на время накопления, от обратной температуры АЧТ. Эти зависимости аппроксимируются формулой $I_{ph} = I(T)/ta = I_0 + I_1 \exp(-E_{eff}/kT)$. Присутствие постоянного слагаемого в этом выражении, по-видимому, отражает вклад темновой генерации в накопленный заряд. Эффективная энергия активации ($E_{eff} = 0,435$ эВ), полученная из этих данных, соответствует ширине запрещённой зоны InAs ($E_g = 0,404$ эВ при $T = 80$ К).

Следует заметить, что определяемая таким образом температура есть эквивалентная температура АЧТ. Различие излучательных способностей объектов при их одинаковой температуре приводит к видимому различию сигналов и, следовательно, эквивалентных температур. Введённая в данной работе функция интенсивности позволяет, во-первых, учесть этот эффект, если известно, что излучательную способность объекта можно охарактеризовать некоторым коэффициентом черноты, и, во-вторых, определить эти коэффициенты, если температура объекта известна.

Заключение. В представленной работе предложен и применён дифференциальный метод определения передаточных характеристик элементов ФПУ. Перевод сигналов в величину, пропорциональную потоку фотонов, позволяет корректно учесть изменение фонового потока и, следовательно, корректно определить абсолютное значение эффективной температуры, что даёт возможность описывать наблюдаемые распределения температу-

ры не только качественно, но и количественно. Метод может быть применён для других типов ФПУ для линейаризации передаточных характеристик приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Базовкин В. М., Гузев А. А., Ковчавцев А. П. и др.** Тепловизионный микроскоп // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 97–102.
2. **Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.** Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.
