621.383.52

Теоретическое и экспериментальное определение внутренней квантовой эффективности кремниевых фотодиодов

А. А. КОВАЛЕВ, А. А. ЛИБЕРМАН, А. С. МИКРЮКОВ, С. А. МОСКАЛЮК, М. В. УЛАНОВСКИЙ

Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: mrsergik@mail.ru

Предложен новый метод обработки экспериментальных вольт-амперных характеристик фотодиодов с использованием реперных точек. Путем сличения трап-детектора, разработанного во ВНИИОФИ и построенного на фотодиодах Hamamatsu S6337 с трап-детектором НН-03-1337, аттестованным при помощи криогенного радиометра в PTB, получено экспериментальное значение внутренней квантовой эффективности фотодиода Hamamatsu S6337.

Ключевые слова: *полупроводниковый фотодиод, вольт-амперная характеристика, внутренняя квантовая эффективность, трап-детектор.*

The theoretical processing of current-voltage characteristics of Hamamatsu S6337 and S1336 photodiodes by least squares method for internal quantum efficiency determination is carried out. A new method of experimental curves processing with use of reference points is purposed. By means of comparison of trap detectors built on the S6337 photodiodes and certified in PTB the experimental value of internal quantum efficiency of Hamamatsu S6337 photodiode is obtained. The discrepancy between theoretical and experimental values was 0,1 %.

Key words: *semiconductor photodiode, current-voltage characteristic, internal quantum efficiency, trap detector.*

В [1, 2] показана теоретическая возможность определения параметров полупроводниковых кремниевых фотодиодов путем сравнения теоретически построенных на основе одномерной модели с произвольными параметрами PC1D вольт-амперных характеристик (ВАХ) с экспериментально измеренными зависимостями. В качестве экспериментальных зависимостей принимали теоретические, полученные при помощи той же модели PC1D, возмущенные случайным образом составляющими по току и напряжению как в реальном эксперименте. При этом среднее значение среднего квадратического отклонения (СКО) теоретических характеристик от экспериментальных должно быть не больше $3 \cdot 10^{-3}$ % при глубине определяемого минимума около 10^{-5} %. Неизвестные параметры находили, решая задачу, обратную построению ВАХ по программе PC1D, и используя значения абсолютного минимума отклонений теоретических кривых от экспериментальных.

В [3] установлено, что одномерная модель PC1D неидеальным образом описывает реальные экспериментальные ВАХ. Отклонения теоретических характеристик от экспериментальных составляют порядка 1 %, что требует отдельного обоснования предлагаемого метода определения внутренней квантовой эффективности *IQE* и, в частности, его точностных характеристик.

Следует отметить, что в данной работе исследуются высокоэффективные фотодиоды фирмы Hamamatsu, относительно внутренних характеристик и структуры которых фирма не предоставляет информации, поскольку, очевидно, это ее ноу-хау. В большинстве случаев в литературе эта информация также отсутствует. Исключение составляет фотодиод Hamamatsu S1337, внутреннюю структуру которого вблизи передней поверхности изучали специально, например в [4].

Упрощение задачи и метод ее решения. В [1, 2] предполагалось, что существует пять неизвестных параметров: n — объемная плотность легирования; N — концентрация легирующей примеси на передней поверхности; L — характерная глубина поверхностной диффузии примеси; S — скорость поверхностной рекомбинации носителей; q — мощность поглощенного лазерного потока. Рассматривали модельную задачу. Фотодиод считали оптически толстым, вследствие чего игнорировали процессы на его задней стенке. Предполагали также, что известны отношение η мощностей, используемых для снятия двух ВАХ, и профиль распределения поверхностной примеси, описываемый с применением дополнительной функции погрешностей.

Среди исследованных фотодиодов наименьшее число неизвестных параметров у фотодиода S6337. Его схема показана на рис. 1. Согласно схеме к пяти упомянутым выше параметрам необходимо добавить скорость $S_з$ рекомбинации на задней стенке, дополнительное сопротивление $R_к$ контактов и толщину H фотодиода. Таким образом, даже в простейшем случае имеем восемь неизвестных параметров (с учетом отношения η — девять).

Получить однозначное решение интересующей нелинейной обратной задачи при таком количестве неизвестных переменных невозможно. Число неизвестных необходимо сократить. Это можно осуществить, если часть параметров измерить, а для оставшихся найти новые функциональные связи.

С этой целью во ВНИИОФИ при помощи сканирующего электронного микроскопа провели исследования попереч-

ных срезов фотодиодов Hamamatsu S6337 и S1337. Пример снимка среза фотодиода S6337 под электронным микроскопом показан на рис. 2, где четко выделяется область структурных изменений вблизи передней поверхности фотодиода, которую естественно связать с областью легирования полупроводника. Однако в силу специфики получения снимков на электронном микроскопе профиль легирования по данному снимку получить нельзя, поскольку сигнал электронного микроскопа не пропорционален концентрации носителей в измеряемой области. В то же время очевидно, что линейный размер области затемнения можно рассматривать как характерную глубину L легирования фотодиода. После обработки снимков для фотодиода Hamamatsu S6337 получили значения L = (45 ± 2) нм, H = (302 ± 3) мкм, а для Hamamatsu S1337 — L = (57 ± 2) нм, H = (300 ± 3) мкм. Параметры L, H фотодиода Hamamatsu S1337 совпадают со значениями из [5].

Отмеченное в [3] расхождение теоретических и экспериментальных кривых, а также узость области интересующих нас напряжений 0,3—0,5 В, в которой наблюдается сильная токовая нелинейность, не дают возможности эффективно использовать метод наименьших квадратов (МНК), так как в этих условиях неизбежны сильные флуктуации значений искомых параметров. Ситуацию можно исправить введением дополнительных функциональных соотношений, которые справедливы, если в процессе измерений фиксировать точки пересечения ВАХ с осью ординат $V = 0$. Такие точки будем считать реперными. Каждая теоретическая ВАХ с соответствующим набором искомых параметров должна проходить через реперную точку. Это существенно уменьшает диапазоны изменения искомых величин.

Напомним, что в [1, 2] для определения пяти неизвестных параметров было предложено использовать две ВАХ с разными значениями мощности q. Тогда правильно выбрать кривые можно при условии прохождения ВАХ через две реперные точки.

После задания внешних параметров q, η в виде неявных функций характеристик фотодиода остаются неизвестными пять параметров: n, N, S, $S_з$, $R_к$. Для их определения использовали аппроксимацию МНК экспериментально измеренных ВАХ фотодиода S6337 теоретическими кривыми, полученными при помощи модели PC1D с фиксированными значениями параметров H, L. Задачу решали нелинейным методом Левенберга—Марквардта [2] со случайно выбранными начальными значениями неизвестных переменных. Чтобы избежать большого объема расчетов, переменную N (т. е. амплитуду легирования в переднем слое) фиксировали в ряде точек. В каждой точке рассчитывали несколько десятков ВАХ со своим набором параметров фотодиода (n, S, $S_з$, $R_к$). Вследствие нелинейности задачи для полученных ВАХ наблюдались локальные минимумы СКО, поэтому решением являлся набор параметров для кривой с минимальным полученным СКО.

Результаты расчетов внутренней квантовой эффективности фотодиодов Hamamatsu S6337 и S1336. Были обработаны пять пар экспериментально измеренных ВАХ ($q \neq 0$) фотодиода Hamamatsu S6337. Следует отметить, что во всех расчетах получили $S_з = 0$, т. е. при фиксированном N фактически было три неизвестных параметра. Это позволило провести вычисления с экспериментально измеренной темновой ВАХ с учетом ее точки пересечения с осью $V = 0$.

При изменении N, как было описано в предыдущем разделе, получены зависимости СКО от IQE (рис. 3), где *1—5* — кривые, полученные с использованием экспериментально измеренных ВАХ. На правой вертикальной шкале показаны минимумы СКО σ_{min}. Левая вертикальная шкала показывает относительное СКО $\Delta\sigma$ каждой кривой на всем диапазоне ее изменения. Разброс σ_{min} для различных кривых составляет 0,03 %, что соответствует статистической погрешности измерений ВАХ. Основное влияние этой погрешности на результаты расчетов заключается в прибавлении постоянного значения к СКО, что не приводит к искажению положения минимума решения.

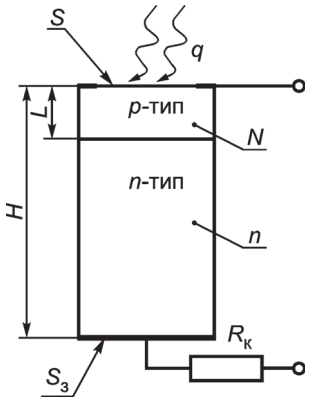

Рис. 1. Схема модели исследуемого фотодиода Hamamatsu S6337

Из рис. 3 следует, что положения минимумов на различных кривых совпадают с достаточно высокой точностью. Среднее значение IQE по минимумам пяти кривых составило 0,99817 ± 0,00006. Очевидно, что СКО для пяти различных кривых будут включать только статистическую погрешность измерений. Таким образом, экспериментально найденная статистическая погрешность определения IQE оказалась пренебрежимо мала по сравнению с другими составляющими погрешности.

Средние значение $\sigma_{ср\ min}$ = 0,83 % для всех пяти кривых представляет систематическую составляющую СКО, возникающую из-за неидеальности модели. Очевидно, что такой вклад также не влияет на положение минимума СКО, поскольку он приводит лишь к сдвигу кривой $\sigma(IQE)$ относительно вертикальной оси.

Соответствующие расчеты были также проведены для фотодиода Hamamatsu S1336, относящегося к той же группе кремниевых фотодиодов, что и Hamamatsu S1337, который имеет структуру pnn^+ [4]. Поэтому дальнейшие вычисления проводили в рамках трехслойной модели pnn^+. В этом случае в схему фотодиода (см. рис. 1) добавляется дополнительный слой на задней стенке, что вносит в существующую модель еще два неизвестных параметра — концентрацию носителей в этой области и ее линейный размер. Численные исследования показали, что последний параметр прак-

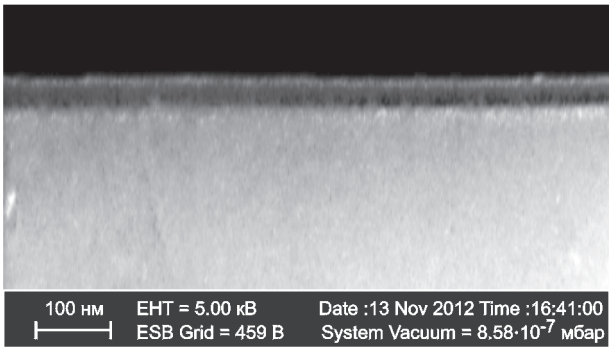

Рис. 2. Поперечный срез фотодиода Hamamatsu S6337 под электронным микроскопом

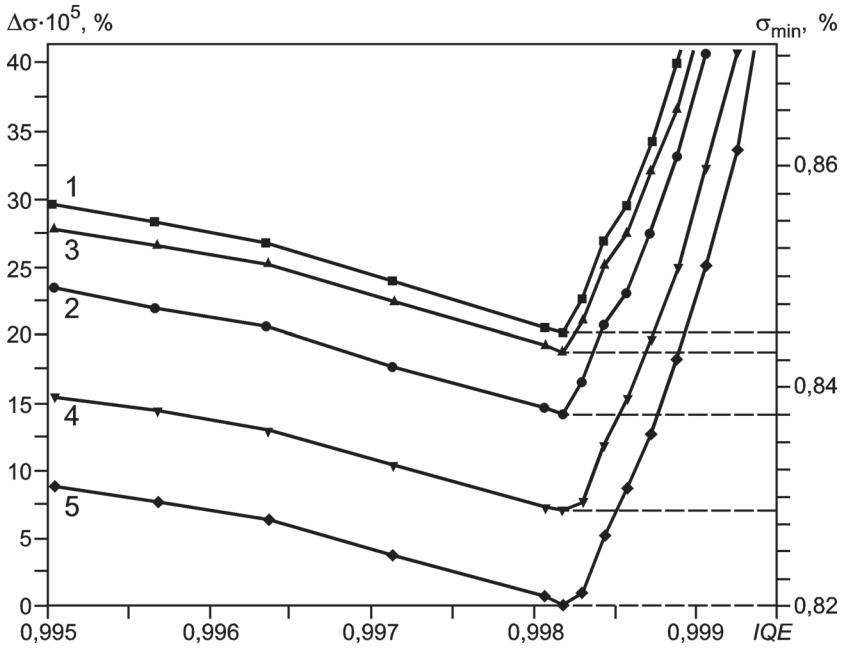

Рис. 3. Зависимости СКО (кривые *1*—*5*), рассчитанные по одной темновой и пяти парам экспериментальных ВАХ, от внутренней квантовой эффективности *IQE*

тически не влияет на СКО и положение σ_{min}. Без ограничения общности размер области взяли равным 1 мкм. Таким образом, при фиксированном *N* в алгоритме присутствуют уже пять параметров, что существенно увеличивает объем вычислений.

Были обработаны три пары экспериментально измеренных ВАХ ($q \neq 0$) фотодиода Hamamatsu S1336. Как и в предыдущем случае, при изменении *N* получили зависимости $\sigma(IQE)$ (рис. 4). Из рис. 4 следует, что все рассчитанные кривые имеют σ_{min} при одном и том же IQE = 0,9978. В данном случае при варьировании сразу пяти переменных, очевидно, большее влияние оказывают случайные погрешности. Так, при IQE = 0,9959 наблюдается дополнительный минимум на третьей кривой. Однако подобные локальные минимумы не мешают определению *IQE* фотодиода, поскольку СКО в локальном минимуме больше, чем в искомом. Кроме того, искомый σ_{min} повторяется на всех кривых $\sigma(IQE)$ в отличие от ложных локальных минимумов, которые наблюдаются лишь на отдельных кривых.

Здесь уместно пояснить следующее: для обоих рассмотренных фотодиодов предварительно была неизвестна структурная схема распределения легированных слоев на тыльной части. Поэтому сначала для каждого были проведены расчеты как по схеме, представленной на рис. 1, так и по усложненной схеме с наличием заднего слоя n^-. Затем выбрана схема, при использовании которой, с одной стороны, наилучшим образом описывались экспериментальные ВАХ, а с другой — полученные параметры не противоречили выбранной модели. Полученные теоретические результаты проверены экспериментально.

Экспериментальные измерения внутренней квантовой эффективности фотодиода Hamamatsu S6337. Для получения результатов измерений проводили сличения точностных характеристик исследуемого трап-детектора, разработанного во ВНИИОФИ, с трап-детектором НН-03-1337, состоящим из трех фотодиодов Hamamatsu S1337 и откалиброванным при помощи криогенного радиометра в РТВ (Германия) с погрешностью 0,02 %. Исследуемый трап-детектор представляет собой приемник, состоящий из шести фотодиодов Hamamatsu S6337 без защитных окон. Излучение, попадающее в него, последовательно отражается от всех фотодиодов, потом от зеркала и тех же фотодиодов в обратном порядке (подвергается 12 отражениям от плоскостей фотодиодов). Поскольку коэффициент отражения кремния составляет 37 %, то покидает трап-детектор лишь $7 \cdot 10^{-6}$ % падающего излучения. Фотодиоды расположены таким образом, что плоскость отражения на каждом из них перпендикулярна плоскости отражения на последующем. Таким образом, *s*- и *p*-поляризации падающего излучения поглощаются равномерно. Все фотодиоды Hamamatsu S6337 из одной партии, и предполагалось, что они имели одинаковую внутреннюю квантовую эффективность. Второй трап-детектор НН-03-1337 состоит из трех фотодиодов Hamamatsu S1337 без защитных окон. Конфигурация этих фотодиодов такова, что излучение совершает пять отражений от поверхностей фотодиодов, прежде чем покинуть приемник.

Для процедуры сличения трап-детекторов использовали лазер Spectra-Physics мощностью 1,6 мВт и с длиной волны 632,8 нм. Согласно паспортным данным его стабильность составляет 0,1 % после 20 мин прогрева. Однако по результатам измерений стабильность лазера была 0,004 % после 1,5 ч прогрева. Реальная амплитуда колебания мощности лазерного излучения после длительного прогрева — 0,02%.

Мощность излучения на полупроводниковых фотодиодах определяли по результатам измерений силы тока короткого замыкания на их выводах с использованием метода нагрузочного сопротивления. В принципе, этот метод не позволяет измерить непосредственно силу тока короткого замыкания, поскольку на нагрузочном сопротивлении образуется дополнительное напряжение, смещающее рабочую точку на ВАХ. Однако при напряжениях смещения на сопротивлении менее 0,1 В искажение измеряемой силы тока отличается от тока короткого замыкания менее чем на 0,01 %. Ток определяли при измерении вольтметром напряжения на нагрузочном сопротивлении. Таким образом, подбирая соответствующее нагрузочное сопротивление для лазерного излучения различной мощности, можно при помощи вольтметра измерять силу тока, практически совпадающую с силой тока короткого замыкания.

При сличении трап-детекторы попеременно устанавливали под излучение лазера и юстировали так, чтобы, с одной стороны, достигался максимум сигнала, а с другой — излучение падало в центр входного отверстия приемника. После каждой смены приемников трап-детекторы юстировали повторно. Так набирали статистические данные, отображающие не только нестабильность мощности лазера, но и погрешность, возникающую в результате юстировки приемников. Мощность лазерного излучения измеряли в течение около 20 мин. В это время проводили 1000 измерений напряжения вольтметром, по результатам которых рассчитывали среднее значение выходного сигнала и СКО в диапазоне 0,002—0,010 %, что объясняется различной стабильностью лазера в разные промежутки времени.

В течение трех дней за сутки проводили до пяти измерений каждым приемником. Итоговая статистическая погрешность составила 0,03 %. При измерениях обоими приемниками использовали одно и то же сопротивление, что исключает дополнительную погрешность, связанную с возможной систематической погрешностью измерений нагрузочного сопротивления. После каждого измерения дополнительно измеряли нагрузочное сопротивление, преобразующее фототок в напряжение. В течение суток это сопротивление не менялось с погрешностью 0,005 %, что исключает влияние изменяющегося сопротивления на измеряемую силу фототока.

Определение квантового дефицита. Мощность W_0 лазерного излучения, измеряемую при помощи трап-детектора НН-03-1337, можно выразить как

$$W_0 = K_{РТВ}\, I_{РТВ} = I_{РТВ}\, hc/(e\lambda\gamma_{РТВ}), \qquad (1)$$

где $K_{РТВ}$ — чувствительность трап-детектора, определенная в РТВ; $I_{РТВ}$ — сила фототока; h, c, e — постоянная Планка, скорость света, заряд электрона; λ — длина волны измеряемого излучения; $\gamma_{РТВ}$ — внешняя квантовая эффективность приемника РТВ,

$$\gamma_{РТВ} = hc/(e\lambda K_{РТВ}). \qquad (2)$$

С учетом (2) соотношение (1) для исследуемого трап-детектора имеет вид

$$W_0 = K_и I_и = I_и\, (hc/(e\lambda\gamma_и), \qquad (3)$$

где $K_и$, $I_и$ — чувствительность и фототок исследуемого трап-детектора.

Из (1), (3) несложно получить равенство

$$I_и / I_{РТВ} = \gamma_и / \gamma_{РТВ}. \qquad (4)$$

Выразим квантовый дефицит как

$$d = 1 - \gamma. \qquad (5)$$

Если пренебречь величинами второго порядка малости, то произведение квантовых эффективностей преобразуется в сумму квантовых дефицитов, а отношение — в разность:

$$\gamma_{РТВ}\gamma_и \to d_{РТВ} + d_и;\ \gamma_{РТВ} / \gamma_и \to d_и - d_{РТВ}.$$

Введем разности сил токов и квантовых эффективностей

$$\Delta I_и = I_{РТВ} - I_и;\ \Delta\gamma_и = \gamma_{РТВ} - \gamma_и. \qquad (6)$$

Тогда с учетом (4), (5) преобразуем (6) к виду

$$1 + d_и = 1 + d_{РТВ} + (1 - d_и)\, \Delta I / I_и,$$

откуда, пренебрегая величинами второго порядка малости, имеем

$$d_и = d_{РТВ} + \Delta I / I_и.$$

В данном случае величиной второго порядка малости является $d\Delta I / I_и = 4 \cdot 10^{-6}$, которой при погрешности измерения 0,03 % можно пренебречь.

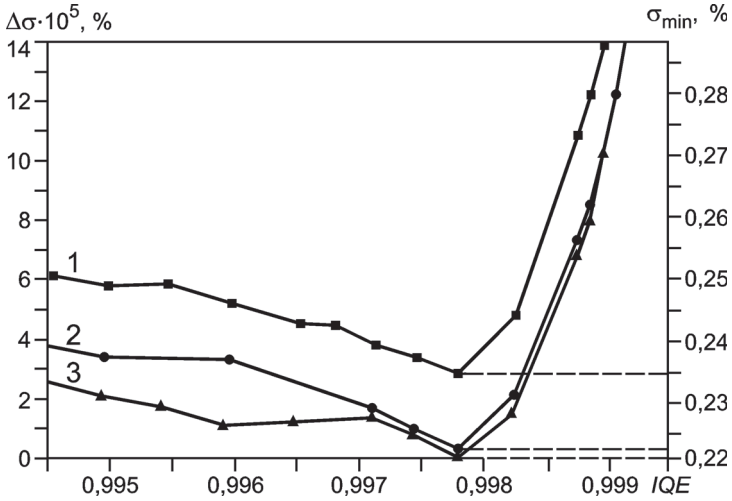

Рис. 4. Зависимости СКО (кривые *1—3*), рассчитанные по трем экспериментальным ВАХ при помощи трехслойной модели, от внутренней квантовой эффективности *IQE*

В результате калибровки получен квантовый дефицит калибруемого трап-детектора 0,0047 ± 0,0003, что соответствует чувствительности приемника 0,5080 ± 0,0002. Таким образом, внешняя квантовая эффективность исследуемого трап-детектора составила 0,9953 ± 0,0003. Поскольку излучение практически не покидает трап-детектор, это значение включает в себя потери на диффузное рассеяние, а также на поверхностную и объемную рекомбинации внутри фотодиода.

В [6] вычислены потери на диффузное рассеяние внутри исследуемого трап-детектора, которые при использованной вертикальной поляризации падающего излучения составляют 0,18 %. С учетом этого обстоятельства оказалось, что *IQE* фотодиодов Hamamatsu S6337 равна 0,9971. В то же время значение 0,9982 найдено при теоретической обработке ВАХ. Таким образом, погрешность определения *IQE* по ВАХ составила около 0,1 %.

Заключение. Следует отметить, что несмотря на несовпадение теоретических и экспериментальных кривых для фотодиода Hamamatsu S6337 ($\sigma \approx 0{,}83$ %) его *IQE* удалось теоретически определить с погрешностью примерно 0,1 %. Одно и то же значение *IQE*, полученное для экспериментальных кривых ВАХ с разным разбросом измеренных точек, объясняется особенностью предложенного в работе метода обработки кривых при помощи реперных точек. Дополнительные расчеты на модельной кривой, возмущенной случайными шумами с разными СКО в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ — $3 \cdot 10^{-2}$ %, при обработке предложенным способом приводят к одному и тому же *IQE*, но к разным СКО, что коррелирует с полученными выше результатами.

Литература

1. **Ковалев А. А. и др.** Определение внутренней квантовой эффективности фотодиода при помощи его вольт-амперных характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 33—36; **Kovalev A. A. e. a.** Determination of theinternal quantum efficiency of a photodiode by means of its current-voltage characteristic // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 2. P. 157—161.

2. **Ковалев А. А. и др.** Вычисление поглощенной фотодиодом мощности излучения по его экспериментальным вольт-амперным характеристикам // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 40—43; **Kovalev A. A. e. a.** Calculation of the radiation power absorbed by a photodiode from its experimental current-voltage characteristics // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 1. P. 57—62.

3. **Ковалев А. А. и др.** Измерение вольт-амперных характеристик термостабилизированных кремниевых фотодиодов // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 22—25; **Kovalev A. A. e. a.** Measurement of the current-voltage characteristics of thermally stabilized silicon photodiodes // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 12. P. 1364—1370.

4. **Geist J. e. a.** Numerical Modeling of Silicon Photodiodes for High-Accuracy Applications. Pt. II. Interpreting Oxide-Bias Experiments // J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 1991. V. 96. N 4. P. 471—479.

5. **Geist J., Baltes H.** High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency // Appl. optics. 1989. V. 28. N 18. P. 3929—3939.

6. **Ковалев А. А. и др.** Потери в самокалибрующихся трап-детекторах за счет диффузного рассеяния // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 38—42. **Kovalev A. A. e. a.** Losses in self-calibrating trap detectors due to diffuse scattering // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 4. P. 408—414.

Дата принятия 17.06.2013 г.

535.417:53.082.54

Сравнение латеральных разрешений оптического и интерференционного микроскопов

Г. Г. ЛЕВИН*, Н. Н. МОИСЕЕВ*, В. Л. МИНАЕВ*, Я. А. ИЛЮШИН**

** Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: minaev@vniiofi.ru*

*** Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

Проведено сравнение латеральных разрешений оптического и интерференционного микроскопов. Рассмотрено понятие латерального разрешения интерференционного микроскопа на основе измерения фазовой ступени. Приведены результаты экспериментов и численного моделирования.

Ключевые слова: *интерференционный микроскоп, латеральное разрешение, фазовая ступенька.*

The comparison of lateral resolutions of optical and interferometric microscopes was carried out. A concept of the interference microscope lateral resolution based on the phase step measurement is considered. The results of experiments and numerical simulations are presented.

Key words: *interference microscope, lateral resolution, phase step.*

Критерий латерального разрешения оптического микроскопа — степень размытия двух точек. В случае если эти точки самосветящиеся, то согласно критерию Релея их изображения находятся на пределе разрешения, когда центральный дифракционный максимум одной совмещен с первым минимумом другой. При этом условии расстояние между максимумами равно радиусу кружка Эйри, а провал по освещенности ΔI составляет 22,5 % [1]. Фактически критерием разрешения является изменение амплитуды световой волны между точками, позволяющее наблюдателю (камере) различить, что они разные, а не сливаются (рис. 1, *а*). *Пунктирной линией* показана сумма интенсивностей сигналов от данных точек, так как волны складываются некогерентно. Вид функции размытия точки не зависит от интенсивности сигнала и, следовательно, критерий Релея энергонезависим [2].

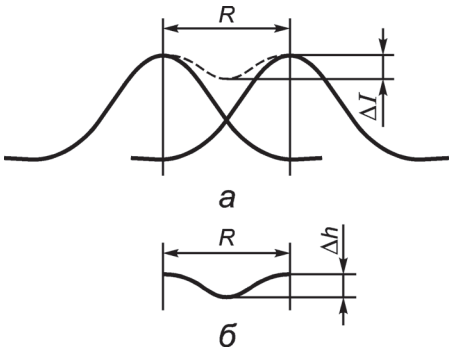

Рис. 1. Критерий разрешающей способности для амплитудного (критерий Релея) (*а*) и фазового (*б*) изображений

При помощи оптического микроскопа регистрируют изменение амплитуды, т. е. исследуют только те объекты, которые изменяют амплитуду излучения (амплитудные объекты), а при применении интерференционного микроскопа (ИМ) регистрируют изменение фазы, и получаемое изображение называют фазовым. Фазовое изображение представляет двумерное распределение оптической разности хода.

Латеральное разрешение фазового изображения ИМ связано с преобразованием фазы, которое может быть обусловлено как изменением геометрии (перепадом высоты),