

06;07;12

Результаты испытаний кремниевых фотодиодов в диагностических экспериментах по томсоновскому рассеянию на токамаке „Туман-3М“ и в стендовых экспериментах

© В.В. Забродский, Д.В. Калинина, Е.Е. Мухин, Г.Т. Раздобарин,
В.Л. Суханов, С.Ю. Толстяков, А.С. Тукачинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 3 февраля 2003 г.)

Проведены испытания кремниевых фотодиодов в качестве детекторов излучения в диагностическом эксперименте по томсоновскому рассеянию в плазме токамака „Туман-3М“. В исследованиях, выполненных на испытательных стендах и путем численного моделирования, проведено сравнение двух типов фотоприемных устройств на основе фотодиодов и лавинных фотодиодов с регистрацией слабых импульсных сигналов разной длительности в присутствии фона стационарной засветки. Для прикладных задач диагностики плазмы токамака, когда фоновое излучение плазмы играет существенную роль, выигрыш чувствительности, обусловленный лавинным усилением, практически исчезает при увеличении длительности регистрируемых сигналов до нескольких сотен наносекунд.

Испытания кремниевого фотодиода в экспериментах по диагностике плазмы токамака методом томсоновского рассеяния

В экспериментах по диагностике плазмы методом томсоновского рассеяния используются разные типы детекторов: фотоумножители (ФЭУ) для видимого диапазона и лавинные фотодиоды (ЛФД) для ближнего ИК диапазона длин волн. Диагностическая система на токамаке „Туман-3М“ оснащена фотоумножителями для регистрации коротковолновой половины спектра рассеянного излучения рубинового лазера. Специфика диагностики томсоновского рассеяния на токамаке „Туман-3М“ состоит в значительной длительности регистрируемых импульсов ≈ 500 ns, характерной для используемой схемы внутррезонаторного зондирования плазмы [1]. Такой способ позволяет достичь большой энергии зондирования с применением сравнительно простой и экономической схемы лазера. В проведенной серии экспериментов была сделана попытка использования альтернативного детектора на основе кремниевого фотодиода (ФД) без внутреннего усиления, отличающегося от фотоумножителя существенно большей квантовой эффективностью. Измерения производились в стандартных разрядах токамака в условиях: разрядный ток 120 кА, тороидальное поле 0.8 Т, концентрация и температура электронов $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \sim 500$ eV. Схема диагностического эксперимента на токамаке „Туман-3М“ (рис. 1) представлена следующими основными компонентами: разрядная камера токамака, лазер и оптическая система формирования зондирующего пучка, спектрометр для анализа спектра рассеяния, многоканальная система регистрации излучения. В экспериментах с фотоприемным

устройством на основе ФД волоконная линия одного из измерительных каналов передавала излучение на площадку детектора диаметром 3 мм. Принципиальная схема фотоприемного устройства приведена на рис. 2. Основные номиналы схемы, определяющие величину эквивалентного шумового заряда [2], по данным стендовых измерений составляли: суммарная входная емкость $C_{\text{en}} = 1.8 \cdot 10^{-11}$ F, приведенная эдс шума на входе предусилителя $U_n = 1.7 \cdot 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$, эквивалентный шумовой ток, приведенный ко входу с учетом шумов Найквиста и токов утечки, $i_n = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}}$ (соответствует эквивалентному суммарному темновому току на входе $I_d = i_n^2/2e = 2 \cdot 10^{-9} \text{ A}$). Для коррекции частотной полосы сигнала с выхода усилителя подавались на RC-формирователь. С его помощью подбиралось наилучшее отношение сигнал/шум при регистрации

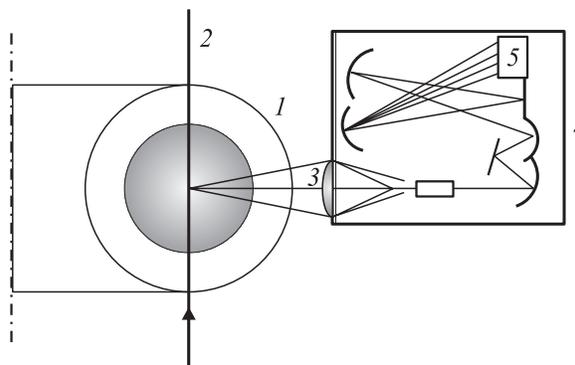


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для диагностики плазмы методом томсоновского рассеяния на токамаке „Туман-3М“. 1 — камера токамака, 2 — зондирующий лазерный пучок, 3 — собирающая оптика, 4 — спектрометр, 5 — фотодетекторы.

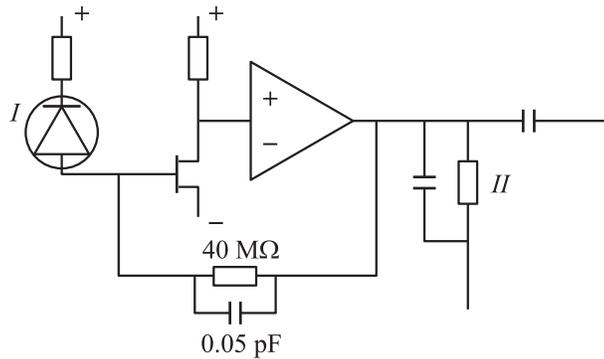


Рис. 2. Принципиальная схема фотоприемного устройства. *I* — ФД, *II* — RC формирователь.

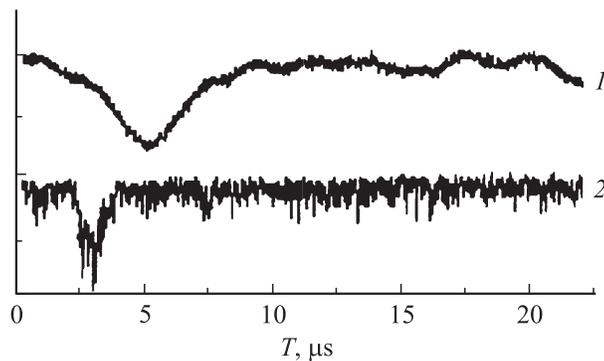


Рис. 3. Осциллограммы сигналов рассеяния при регистрации излучения с помощью ФД (*1*) и ФЭУ (*2*) в двух соседних спектральных каналах.

сигналов рассеянного в плазме излучения. На рис. 3 (кривая *1*) приведена осциллограмма с регистрацией излучения в спектральном канале, оснащённом ФД. По данным абсолютной калибровки диагностической аппаратуры энергия измеряемого импульса рассеянного излучения составляла около 10^3 фотонов. Для сравнения на том же рисунке (кривая *2*) показана типичная осциллограмма с записью сигнала рассеяния фотоумножителем, полученная в соседнем спектральном канале. Шумовые дорожки на нижней и верхней осциллограммах рис. 3 определяются источниками шума разного происхождения. Для фотоумножителя шумовой сигнал обусловлен преимущественно дробовым шумом фототока от фонового излучения плазмы, интенсивность которого, исходя из измеренного фототока ~ 1 нА, была сравнима со средней интенсивностью сигнала рассеяния за время ~ 500 нс. Для ФД основным источником флуктуаций является шум входной цепи усилителя. При оптимальном формировании частотного спектра шумового сигнала с помощью RC-формирователя, относительная величина среднеквадратичной ошибки измерения заряда составила $\sim 15\%$, что вполне приемлемо для диагностических экспериментов методом томсоновского рассеяния.

Результаты стендовых испытаний

Задача стендовых экспериментов состояла в анализе оптимальных условий регистрации световых импульсов кремниевыми фотодиодами в широком диапазоне параметров входных сигналов. В стендовых экспериментах светодиод АЛ106, моделирующий сигналы томсоновского рассеяния, проецировался с помощью объектива на диафрагму диаметром 1 мм, за которой размещались сменные приемники различных типов: абсолютно калиброванный детектор, а также фотоприемные устройства на основе ФД и лавинного фотодиода (ЛФД). Сигналы с выхода усилительного каскада подавались на RC-формирователь NE5259 фирмы Nuclear Enterprises и затем оцифровывались. Основное назначение формирователя состояло в увеличении отношения сигнала к шуму путем коррекции частотной полосы. Параметры испытываемого фотоприемного устройства на основе ФД были такие же, как в экспериментах с плазмой на токамаке „Туман-3М“. Без дополнительной коррекции частотной полосы постоянные времена, соответствующие переднему и заднему фронту импульсной характеристики, составляли 0.5 и 2 μ s.

В альтернативной схеме фотоприемного устройства на основе ЛФД серии С30955Е фирмы Perkin Elmer использовался малошумящий усилитель с полевым транзистором КП341А на входе. В этом основное отличие принятой нами схемы от обычно применяемых [3,4] схем на операционных усилителях таких как CLC-425 и МАХ-4107. Значительный эквивалентный шумовой ток, приведенный ко входу $\approx 10^{-12}$ А/ $\sqrt{\text{Гц}}$ для таких схем, заставляет выбирать большие коэффициенты внутреннего усиления ЛФД и, как следствие, мириться с повышенным коэффициентом избыточного шума [4].

Для абсолютной калибровки зарядовой чувствительности аппаратуры производились измерения выходных амплитуд при подаче на вход световых сигналов разной длительности (500 и ≈ 50 нс) с калиброванным световым потоком. Генерация шумовых сигналов производилась при квазистационарной засветке детекторов от калиброванного светового источника при различных уровнях фототока до 50 нА. Для нахождения величины эквивалентного шумового заряда вычислялась среднеквадратичная флуктуация шумового сигнала. С этой целью производилась оцифровка временной реализации шумового сигнала в 2500 временных точках за период времени длительностью несколько миллисекунд. Результаты математической обработки сравнивались с показаниями квадратичного вольтметра. Величина эквивалентного шумового заряда определялась как число фотоэлектронов, обеспечивающее амплитуду импульсного сигнала на выходе формирователя, равную измеренной среднеквадратичной флуктуации шумового сигнала. Кривая *1* на рис. 4 соответствует значениям эквивалентного шумового заряда для фотодиода $\sqrt{N_{PD}^2}$ в отсутствие фоновой квазистационарной засветки. Вдоль горизонтальной оси отложены экспериментальные значения длительности

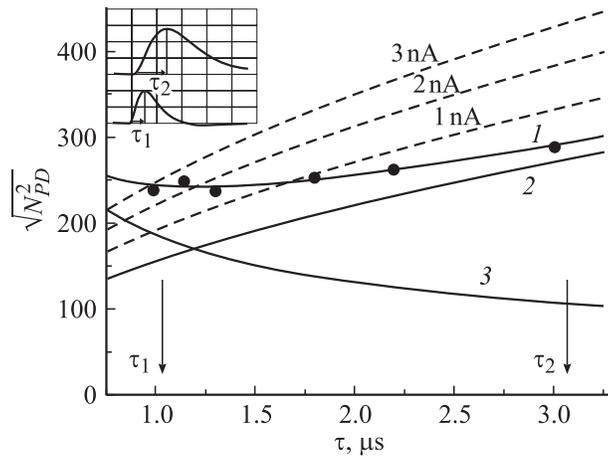


Рис. 4. Зависимость эквивалентного шумового заряда в электронах от постоянной времени формирователя. Стрелками отмечены значения постоянной времени формирователя $\tau_1 = 1 \mu\text{s}$ и $\tau_2 = 3 \mu\text{s}$ для соответствующих осциллограмм выходного сигнала, приведенных в верхнем углу рисунка. 1 — результаты эксперимента, 2 и 3 иллюстрируют относительный вклад токового и эдс компонента шума, штриховые кривые — токовая компонента шума в присутствии фототока фоновой стационарной засветки. У штриховых кривых — значения фототока.

переднего фронта до максимума импульсной характеристики, осциллографируемой на выходе формирователя. Представленные результаты измерений практически не зависели от длительности входных световых импульсов, варьируемых в интервале от десятков до 500 ns. Кривая 1, проведенная через экспериментальные точки, аппроксимировалась простой зависимостью $\sqrt{a\tau + b/\tau}$, характерной для эквивалентного CR–RC-формирователя при одинаковых постоянных времени дифференцирования и интегрирования [5].

Хорошее соответствие экспериментальных точек и аппроксимационной кривой 1 позволяет анализировать экспериментальные результаты, используя упрощенную модель эквивалентного CR–RC-формирователя с характерной постоянной времени τ , равной длительности переднего фронта до максимума импульсной характеристики. При сделанных допущениях кривые 2 и 3 на рис. 4 показывают относительный вклад токового $\sqrt{a\tau}$ и эдс $\sqrt{b/\tau}$ шумов в зависимости от постоянной времени формирователя τ . В отсутствие фона стационарной засветки значение τ следует выбирать в пределах пологого минимума на кривой 1. При наличии фототока стационарной засветки, превышающего значение темнового тока $I_b > I_d$, вклад токового шума соответственно увеличивается пропорционально $\sqrt{I_b/I_d}$ (штриховые кривые на рис. 4). В таких условиях для минимизации шума следует выбирать меньшие значения τ исходя из равенства шумовых компонент эдс и тока в присутствии фона стационарной засветки.

Семейство кривых на рис. 5 показывает зависимость измеренных значений величины эквивалентного шумового заряда $\sqrt{N_{PD}^2}$ от квадратного корня значений фототока фоновой стационарной засветки. Каждая из приведенных кривых соответствует результатам, полученным с определенной постоянной времени формирователя в пределах от 1 до 2.2 μs . Расчетная штриховая кривая 5 соответствует минимальным значениям эквивалентного шумового заряда в условиях, когда постоянная времени формирователя τ выбирается исходя из равенства шумовых компонент тока и эдс. Как видно из рис. 5, при таком формировании сигналов величина эквивалентного шумового заряда заметно уменьшается, особенно при больших значениях фоновой засветки.

На рис. 6 представлены результаты экспериментов, выполненных с ЛФД детектором. Коэффициент внутреннего усиления $M \sim 30$ устанавливался при соответствующем напряжении смещения 250 В. При трехкратном увеличении внутреннего усиления ЛФД наблюдался рост шумового сигнала примерно на 25% в соответствии с известным эффектом увеличения коэффициента избыточного шума [6].

Приведенные на рис. 6 зависимости эквивалентного шумового заряда от квадратного корня значений фототока фоновой стационарной засветки соответствуют двум различным значениям длительности входного сигнала 500 и 50 ns. Отличительным признаком ЛФД детектора является относительно малый вклад эдс шума, особенно при использовании малошумящего входного каскада усилителя. В этих условиях не требуются большие значения постоянной времени формирователя. В случае длинного сигнала (а) постоянная времени формирователя τ выбиралась ≈ 500 ns исходя из длительности

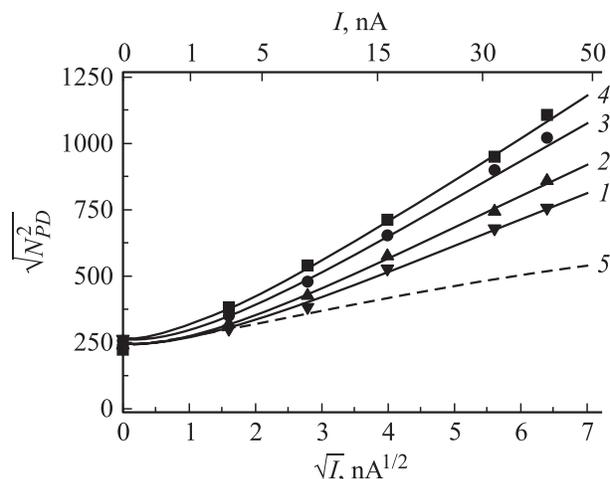


Рис. 5. Зависимость величины эквивалентного шумового заряда в электронах для ФД от квадратного корня значений фототока фоновой стационарной засветки. τ , μs : 1 — 1, 2 — 1.3, 3 — 1.8, 4 — 2.2. Штриховая кривая 5 — расчетные значения эквивалентного шумового заряда в условиях, когда время формирования сигнала выбирается, исходя из равенства шумовых компонент тока и эдс.

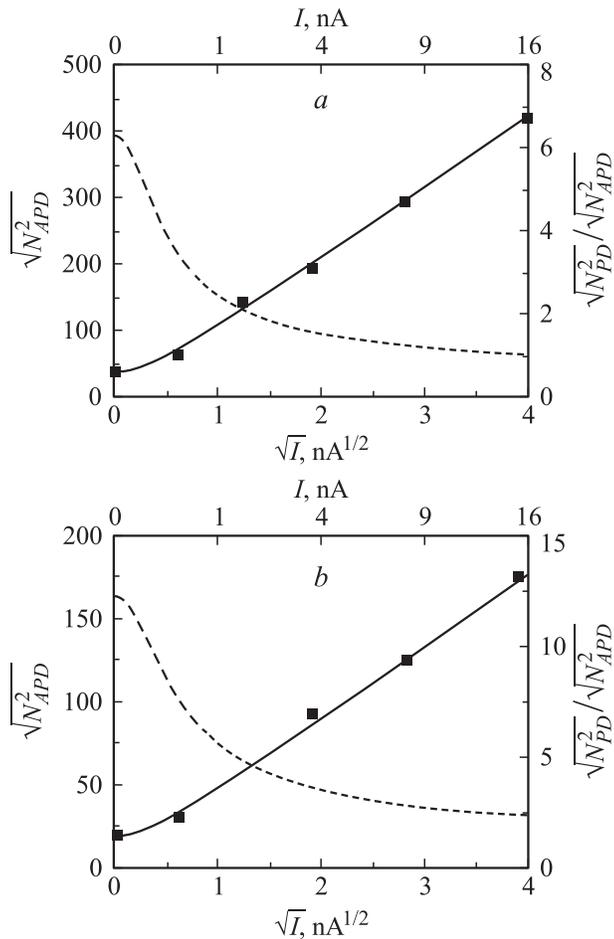


Рис. 6. Зависимость величины эквивалентного шумового заряда в электронах для ЛФД от квадратного корня фототока фоновой стационарной засветки при регистрации сигналов разной длительности t, ns : a — 500, b — 50 (сплошные кривые). Штриховые кривые (шкала справа) — выигрыш чувствительности, обусловленный внутренним усилением ЛФД по сравнению с фотодиодом при соответствующем формировании сигналов согласно штриховой кривой на рис. 5.

входного сигнала. В случае измерения короткого сигнала (b) постоянная времени формирователя ≈ 100 ns определялась длительностью переднего фронта импульсной характеристики используемого предусилителя с отключенной схемой внешнего формирователя. Для подавления низкочастотных колебаний длительность заднего фронта импульсной характеристики ограничивалась дифференцированием выходных сигналов. Без внешней засветки величина эквивалентного шумового заряда составляла около 30 электронных зарядов. В присутствии фототока внешней засветки, превышающей темновой ток, измеренные значения эквивалентного шумового заряда увеличивались в соответствии с корневой зависимостью от фототока. Штриховые кривые на рис. 6 показывают выигрыш чувствительности, обусловленный внутренним усилением ЛФД, по сравнению с фото-

диодом при соответствующем формировании сигналов согласно штриховой кривой на рис. 5.

Обсуждение экспериментальных результатов

Для сравнения фотоприемных устройств на основе ФД и детекторов с внутренним усилением по величине минимально измеримого сигнала удобно использовать известные соотношения для эквивалентного шумового заряда [5] в схемах формирования со стробированием сигнала на выходе зарядочувствительного усилителя. Для такого типа формирователя с фильтрацией низкочастотного шума методом двойной коррелированной выборки величина эквивалентного шумового заряда при произвольном значении коэффициента внутреннего усиления $M \geq 1$ может быть вычислена в хорошем приближении по формуле

$$\sqrt{N^2} = \sqrt{F \cdot \frac{I}{e} \cdot \left(t + \frac{2}{3} \tau\right) + \frac{1}{M^2} \left(\frac{\sigma}{e}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\sigma = C_{en} U_n / \sqrt{\tau}$ — величина эквивалентного шумового заряда, зависящая от приведенной эдс шума (U_n) на входе предусилителя, суммарной входной емкости (C_{en}), а также от выбора длительности ворот τ ; t — длительность измеряемого сигнала; F — шум-фактор для детекторов с внутренним усилением; I — величина фототока внешней засветки и темнового тока (малые члены, соответствующие дробовому шуму измеряемого сигнала на входе детектора, а также относительно малому току утечки полевого транзистора на выходе детекторов с внутренним усилением, не учитываются).

При рассмотрении фотодиода длительность ворот τ в (1) рекомендуется выбирать, исходя из номиналов схемы фотоприемного устройства в соответствии с требованием минимума шумового сигнала на выходе формирователя. Обычно длительность ворот выбирают таким образом, чтобы вклад токового и эдс компонент шума, представленных слагаемыми в (1), был одинаков [2]. При этом формула (1) с учетом очевидных условий $M = 1$, $F = 1$ преобразуется к виду

$$\sqrt{N_{PD}^2} = \sqrt{2 \cdot \frac{I_{PD}}{e} \cdot \left(t + \frac{2}{3} \tau_{PD}\right)}, \quad (2)$$

где длительность ворот, обычно превышающая длительность измеряемого импульса, оказывается

$$\tau_{PD} = \frac{C_{en} \cdot U_n}{\sqrt{\frac{2}{3}} e \cdot I_{PD}}$$

Для альтернативных детекторов с внутренним усилением $M \gg 1$ в отличие от ФД длительность ворот τ может выбираться короткой. Во всяком случае она не

должна заметно превышать длительность измеряемого сигнала, что приводило бы к увеличению токовой компоненты шумового заряда. Для лавинного фотодиода с учетом характерных значений $M \approx 50$, $\tau \geq 100$ ns, $I \geq 0.1$ nA токовая компонента шума

$$\sqrt{F_{APD} \frac{I_{APD}}{e} \cdot \left(t + \frac{2}{3} \tau_{APD}\right)}$$

в (1) превосходит компоненту эдс шума

$$\frac{1}{M} \left(\frac{\sigma_{APD}}{e}\right),$$

вычисленную исходя из приведенных ранее номиналов $U_n = 1.7 \cdot 10^{-9}$ V/ $\sqrt{\text{Hz}}$, $C_{en} = 1.8 \cdot 10^{-11}$ F. В этих условиях эквивалентный шумовой заряд для ФД, определяемый формулой (2), относится к величине эквивалентного шумового заряда для ЛФД детектора с внутренним усилением согласно

$$\frac{\sqrt{N_{PD}^2}}{\sqrt{N_{APD}^2}} = \frac{\sqrt{2 \frac{I_{PD}}{e} \left(t + \frac{2}{3} \tau_{PD}\right)}}{\sqrt{F_{APD} \frac{I_{APD}}{e} \left(t + \frac{2}{3} \tau_{APD}\right)}}. \quad (3)$$

Для сравнения с результатами испытаний в стендовых экспериментах оценки величин эквивалентного шумового заряда для ФД и ЛФД детекторов можно выполнить, исходя из следующих характерных значений параметров: приведенный ко входу эквивалентный шумовой ток $\sqrt{2eI_{PD}} = 2.5 \cdot 10^{-14}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$, $\sqrt{2eI_{APD}F} \sim 10^{-14}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$, выбранные длительности ворот $\tau_{PD} = 2$ μ s, $\tau_{APD} = 0.1$ μ s. В этом случае отношение $\frac{\sqrt{N_{PD}^2}}{\sqrt{N_{APD}^2}}$, согласно (3), составляет величины 6.5 и 12.5 при измерении сигналов разной длительности 500 и 50 ns соответственно. Приведенная оценка хорошо совпадает с результатами эксперимента на рис. 6 в отсутствие фототока фоновой стационарной засветки. При сравнении детекторов необходимо учитывать внешнюю засветку, обусловленную собственным излучением плазмы. Характерные значения фототока от собственного излучения плазмы обычно составляют от ≈ 1 nA (по результатам измерений на токамаке „Туман-3М“) до десятков nA для крупных токамаков. Как следует из рис. 5, эквивалентный шумовой заряд для ФД приемника эволюционирует слабо до тех пор, пока фототок стационарной внешней засветки не превосходит величину темнового тока ~ 2 nA. Напротив, токи такой величины, обусловленные внешней засветкой, существенно превосходят достаточно малый темновой ток ЛФД. В результате различие чувствительностей сравниваемых детекторов становится существенно меньше, особенно для достаточно больших длительностей измеряемых импульсов порядка сотен ns. Как следует из уравнения (3), выигрыш чувствительности лавинного фотодиода, обусловленный внутренним усилением, практически отсутствует в том случае, когда длительность светового импульса достигает ≈ 500 ns при характерных значениях фототока от внешней засветки (несколько наноампер).

Выводы

В диагностических экспериментах по томсоновскому рассеянию на токамаке „Туман-3М“ проведены испытания кремниевых фотодиодов в качестве детекторов для регистрации слабых сигналов на фоне собственного излучения плазмы. Показано, что фотоприемные устройства на основе кремниевых фотодиодов по своим эксплуатационным характеристикам пригодны для измерения интенсивности сигналов рассеяния с энергией $\sim 10^3$ фотонов за импульс. В стендовых экспериментах исследованы вопросы дефицита чувствительности фотодиодов по сравнению с альтернативными детекторами на основе лавинных фотодиодов. Для коротких импульсов ≈ 50 ns при умеренных значениях фототока от собственного излучения плазмы (масштаба нескольких nA) выигрыш чувствительности лавинных фотодиодов, обусловленный внутренним усилением (около 50), составил от 3 до 4 раз. При увеличении длительности регистрируемых световых сигналов до ≈ 500 ns, а также в том случае, когда значения фототока от собственного излучения плазмы достигают десятков nA, выигрыш чувствительности лавинного фотодиода практически отсутствует. Очевидное достоинство фотодиода по сравнению с другими детекторами заключается в его существенной простоте и надежности в эксплуатации, что особенно важно для построения многоканальных систем регистрации излучения.

Список литературы

- [1] Petrov Yu.V., Razdobarin G.T., Tolstyakov S.Yu., Tuka-chinsky A.S. // Proc. 8th Intern. Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics. Doorwerth (The Netherlands), 1997. P. 211.
- [2] Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС, обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992.
- [3] Hsieh C.L., Haskovec J., Carlstrom T.N. et al. // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 61. P. 2855.
- [4] Orsitto F., Brusadin A., Giovannozzi E. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 1201.
- [5] Goulding F.S. // Nuclear Instr. & Methods. 1972. Vol. 100. P. 493.
- [6] McIntyre R.J. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1966. Vol. ED-13. P. 164.