

06;07;12

Измерение временных и спектральных характеристик кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов в мягком рентгеновском диапазоне

© А.В. Голубев¹, А.А. Сорокин², Е.Г. Пивинский¹, С.В. Бобашев², В.В. Акулиничев¹¹ Институт аналитического приборостроения РАН,
198103 Санкт-Петербург, Россия² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 2 февраля 1998 г.)

Кратко описана методика исследования временных и спектральных характеристик детектора мягкого рентгеновского излучения в интервале энергий фотонов от нескольких десятков до тысячи электрон-вольт. Представлены измеренные характеристики (время нарастания сигнала, временное разрешение, абсолютная спектральная чувствительность) и определенные по результатам измерений параметры (толщины контактного, "мертвого" и чувствительного слоев) некоторых типов быстрых кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов различных производителей (Siemens, Hamamatsu, Motorola, НИИИТ/Москва), которые могут быть использованы в аппаратуре для рентгеновской диагностики плазмы с временным разрешением около 1 ns и лучше.

Введение

Кремниевые $p-i-n$ -фотодиоды стали активно использоваться для детектирования с временным разрешением излучения короткоживущей плазмы в мягком рентгеновском (МР) диапазоне спектра ($40 < h\nu < 6000$ eV) начиная с 70-х годов [1]. За это время появилось много экспериментальных работ, в которых использовались как специально разработанные для МР диапазона спектра фотодиоды [2–4], так и фотодиоды, созданные для видимого диапазона спектра [5,6]. Столь широкое практическое распространение кремниевые $p-i-n$ -фотодиоды получили благодаря ряду свойств, выгодно отличающих их от других полупроводниковых детекторов. К таким свойствам следует отнести высокое временное разрешение, достаточную для фотометрии импульсных плазменных источников чувствительность в МР области спектра, большой линейный диапазон и относительную дешевизну.

Для корректной интерпретации получаемых при исследовании импульсной плазмы результатов необходимо знать спектральные и временные характеристики фотодиодов в МР диапазоне спектра. Временные характеристики определяют возможности фотодиодов при передаче тонкой временной структуры процесса излучения импульсного источника (например, Z-пинча, лазерной плазмы) в виде формы импульсов выходного тока. Спектральные характеристики определяют возможности использования фотодиодов для абсолютной МР фотометрии импульсной плазмы.

Быстрые $p-i-n$ -фотодиоды должны иметь достаточно тонкий i -слой собственной проводимости, малую площадь активной области, низкие сопротивление и емкость i -слоя [4]. Известно, что сопротивление и емкость i -слоя могут быть значительно снижены при подаче на фотодиод напряжения смещения, создающего величину электрического поля внутри структуры выше 10^4 V/cm. Наряду с площадью активной области толщина i -слоя

остается в этом случае практически единственным фактором, определяющим отклик того или иного фотодиода. Толщина i -слоя может быть с хорошей точностью оценена из экспериментально измеренного времени нарастания сигнала с фотодиода [7], возникающего как отклик на воздействие входного δ -импульса (< 0.2 ns) лазерного [7] или рентгеновского [3] излучения.

Спектральные характеристики кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов в МР диапазоне определяются в основном энергией образования электронно-дырочной пары в кремнии, пропусканием мягкого рентгеновского излучения (МРИ) контактным металлическим слоем на поверхности фотодиода и "мертвым" слоем кремния, а также поглощением излучения в чувствительной i -области полупроводника. При этом для расчета чувствительности используются простая "двухтолщинная" модель $p-i-n$ -фотодиода [2,7–9] и данные о коэффициентах поглощения в рентгеновской области спектра [11, раздел 3]. Энергия образования электронно-дырочной пары в кремнии имеет одинаковое и хорошо известное значение (3.64 ± 0.03 eV [9]) для всех кремниевых фотодиодов. Толщины контактного и "мертвого" слоев могут быть определены из экспериментально измеренных величин абсолютной чувствительности фотодиода в отдельных спектральных точках МР диапазона. Знание же толщин поглощающих слоев дает возможность рассчитывать функцию спектральной чувствительности фотодиода во всем МР диапазоне энергий фотонов.

Абсолютная спектрально-селективная калибровка, вообще говоря, любого рентгеновского фотодиода осуществляется с применением первичного стандартного детектора [10–14]. Кроме этого, известны способы абсолютной калибровки фотодиодов с использованием первичного стандарта излучения (например, синхронного излучения (СИ)) [10], а также методом "самокалибровки" на источнике СИ [15]. При этом наиболее надежные и точные (погрешность $< 1\%$) спектрально-селективные калибровочные измерения могут прово-

даться в настоящее время на источнике СИ при использовании криогенного болометра в качестве первичного стандарта [12]. Однако в случае калибровки быстрых $p-i-n$ -фотодиодов ее проведение на источнике СИ затруднено из-за малых по сравнению с размером пучка фотонов площади активной области таких фотодиодов и недостаточно высоким соотношением сигнал-шум на выходе $p-i-n$ -фотодиодов. На практике удобным представляется использование для измерения абсолютной чувствительности $p-i-n$ -фотодиодов импульсного интенсивного (например, лазерно-плазменного) источника МРИ в комбинации с первичным стандартным детектором [13,16].

Целью настоящей работы было исследование временных и спектральных характеристик $p-i-n$ -фотодиодов, перспективных с точки зрения диагностики короткоживущей плотной плазмы в МР диапазоне спектра. Описывается методика и представлены результаты измерений временных характеристик фотодиодов четырех типов от разных производителей: СППД11-04 (НИИИТ, Москва), MRD510 (Motorola), ВРХ65 (Siemens) и S4753 (Hamamatsu). Кратко излагается методика и суммируются результаты систематических исследований спектральных характеристик кремниевых фотодиодов СППД11-04 и MRD510, которые использовались авторами в течение ряда лет в экспериментах по исследованию различных импульсных плазменных объектов [16–21]. Определены спектральные параметры фотодиодов ВРХ65 и S4753.

Измерения временных характеристик фотодиодов

В настоящей работе временные характеристики $p-i-n$ -фотодиодов определялись по измеренным откликам фотодиодов на воздействие МРИ лазерной плазмы, создаваемой при фокусировке коротких лазерных импульсов на медную мишень, расположенную в вакуумной камере. Измерения проводились на исследовательском лазерном комплексе, созданном в Институте аналитического приборостроения РАН.

Лазерные импульсы формировались путем двухкаскадного последовательного временного сжатия импульсов задающего генератора при вынужденном рассеянии Манделъштамма–Бриллюэна [22] с последующим усилением в двух однопроходовых усилителях на YAG:Nd³⁺. Задающий генератор [23] представлял собой импульсно-периодический лазер на YAG:Nd³⁺ с пассивной модуляцией добротности ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, частота повторения 0.5 Hz, длительность импульса 8 ns). Сформированные на выходе системы лазерные импульсы имели длительность 0.12 ns и энергию $\sim 200 \text{ mJ}$, что обеспечивало плотность мощности сфокусированного на мишени излучения $\sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$. Длительность лазерных импульсов — наиболее важной для наших измерений величины контролировалась электронно-оптической фотохронографической камерой "Агат-СФ-1", имеющей временное разрешение около 3 ps.

Для исследований были взяты коммерческие фотодиоды трех фирм-производителей: ВРХ65 (Siemens), MRD510 (Motorola), S4753 (Hamamatsu), разработанные для детектирования видимого излучения, а также один экземпляр специально созданного рентгеновского $p-i-n$ -фотодиода СППД11-04 (НИИИТ, Москва).

Для всех диодов были известны паспортные данные о площади активной области и рекомендуемом напряжении питания. Для фотодиодов ВРХ65, MRD510 и S4753 имелись также паспортные данные о чувствительности и временном разрешении в видимом диапазоне спектра (наилучшим временным разрешением около 0.7 ns в видимом диапазоне спектра обладал фотодиод S4753). Толщина контактного слоя золота на поверхности вышеперечисленных фотодиодов составляла несколько десятков ангстрем. Про фотодиод СППД11-04 было дополнительно известно, что на его рабочей поверхности имелся контактный слой из алюминия толщиной менее 0.1 μm , что толщина "мертвого" слоя фотодиода составляла менее 0.3 μm , а толщина чувствительной области — менее 80 μm .

На базе имеющихся фотодиодов были собраны детекторы МРИ. Для этого каждый фотодиод помещался в корпус из нержавеющей стали, а его вывод припаивался к коаксиальному пятидесятиомному выходу. С фотодиодов ВРХ65, MRD510 и S4753 были предварительно удалены стеклянные окна, поглощающие МРИ. Входные окна детекторов были закрыты мелкоструктурной никелевой сеткой прозрачностью 67% для подавления электромагнитных наводок на фотодиоды, возникающих при образовании лазерной плазмы на мишени. Все детекторы располагались в вакуумной камере на расстоянии 10 см от мишени.

Для выделения из спектра излучения лазерной плазмы требуемого МР диапазона и в то же время для предотвращения регистрации паразитного видимого и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения плазмы входные окна детекторов были закрыты фильтрами. Фильтры представляли собой тонкие металлические пленки, свободно лежащие на мелкоструктурных сетках. В работе использовались три типа фильтров для выделения излучения в трех различных спектральных диапазонах: пленка из меди толщиной 0.46 μm , пленка из серебра толщиной 0.27 μm и пленка из алюминия толщиной 0.2 μm . Все фильтры были изготовлены и протестированы в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (пропускание фильтров для ряда спектральных точек измерялось на спектрометре РСМ-500 с рентгеновской трубкой). Спектральные характеристики пропускания фильтров были рассчитаны на основании полученных в результате тестирования данных о толщине металлических пленок и данных о коэффициентах поглощения, взятых из работы [11]. Расчеты показали, что фильтр из меди позволял выделить преимущественно излучение в спектральном диапазоне от 500 до 933 eV, где пропускание фильтра составляло 10–35%, фильтр из серебра позволял выделить излучение в спектральном диапазоне от 100 до

Параметры исследованных кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов

| Тип фотодиода | a, mm^2 | Напряжение смещения, V | $\tau_{0.1}, \text{ns}$ | $\tau_{0.5}, \text{ns}$ | τ_r, ns | $d_i, \mu\text{m}$ | $d_c, \mu\text{m}$ | $d_d, \mu\text{m}$ | $S_{\text{max}}^*, \text{A} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ | $S_{\text{max}}, \text{A}/\text{W}$ |
|---------------|------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|-------------------------------------|
| S4753 | 0.125 | 30 | 1.25 | 0.65 | 0.42 | 20 | < 0.01 | < 0.3 | $3.43 \cdot 10^{-4}$ | 0.275 |
| MRD510 | 0.25 | 30 | 1.33 | 0.75 | 0.63 | 30 | 0.002 | 0.27 | $6.90 \cdot 10^{-4}$ | 0.276 |
| BPX65 | 1.00 | 50 | 8.75 | 3.80 | 1.50 | 70 | < 0.01 | > 0.3 | $2.75 \cdot 10^{-3}$ | 0.275 |
| СППД11-04 | 5.00 | 160 | 3.30 | 1.40 | 1.00 | 50 | 0.025 | 0.20 | $1.38 \cdot 10^{-2}$ | 0.276 |

400 eV, где пропускание составляло 5–15%, а фильтр из алюминия — в низкоэнергетическом диапазоне от 20 до 70 eV, где пропускание составляло 30–40%. Следует заметить, что вышеуказанное деление на спектральные интервалы является достаточно условным, поскольку в области энергий фотонов свыше 1000 eV пропускание всех трех фильтров одинаково быстро растет до 100% с увеличением энергии фотонов. Поэтому сигналы с фотодиодов содержали высокоэнергетичную компоненту излучения лазерной плазмы. В видимом диапазоне спектра пропускание всех трех фильтров было на много порядков ниже, чем в рентгеновском; в частности на длине волны 650 nm измеренное пропускание всех трех фильтров составляло менее 10^{-6} %.

Регистрация электрических сигналов с фотодиодов осуществлялась с помощью широкополосного (5 GHz) запоминающего осциллографа СРГ-7. При осциллографической регистрации сигналов с фотодиода его временное разрешение $\tau_{0.5}$, определяемое как выраженная в единицах времени ширина на полувысоте импульса выходного тока, может быть найдено из соотношения [24]

$$\tau_{0.5} = (\tau_1^2 - \tau_2^2 - \tau_3^2 - \tau_4^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где τ_1 есть измеренная экспериментально длительность (на полувысоте) сигнала с фотодиода, τ_2 — длительность (на полувысоте) падающего на фотодиод МРИ, τ_3 и τ_4 — временное разрешение коаксиальной линии передачи и записывающей электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) осциллографа соответственно.

Известно, что длительность импульса МРИ лазерно-плазменного источника, имеющего мишень с большим атомным номером, для энергий фотонов, близких к 1000 eV и выше, сравнима с длительностью греющего лазерного импульса [25]. Указанное обстоятельство позволило нам считать, что длительность приходящего на детектор МРИ в измерениях с медным фильтром, пропускающим лишь излучение с энергиями фотонов свыше 500 eV, была около 0.12 ns. Временное разрешение используемой в эксперименте коаксиальной линии (волновое сопротивление 50 Ω , длина 1 m) составляло $5 \cdot 10^{-11}$ s, а временное разрешение ЭЛТ — $5 \cdot 10^{-11}$ s [24]. Измеряемые в эксперименте длительности сигналов с фотодиодов (в качестве примера на рис. 1 представлены характерные формы сигналов с детектора, собранного на основе фотодиода СППД11-04, с медным и алюминиевым фильтрами на входном окне), превышали эти значения более чем на порядок. Поэтому мы считали, что при

измерениях с медным фильтром $\tau_{0.5} = \tau_1$ с абсолютной погрешностью 0.12 ns. В измерениях с использованием серебряного и особенно алюминиевого фильтра сигналы с фотодиодов имели значительно большую длительность, чем в измерениях с использованием медного фильтра (рис. 1). Это происходило вследствие регистрации фотодиодами более низкоэнергетичной компоненты излучения лазерной плазмы, время высвечивания которой много больше длительности создающего плазму лазерного импульса.

Немаловажными параметрами с точки зрения применения фотодиодов в диагностике плазмы и фотометрии являются временное разрешение $\tau_{0.1}$, определяемое как выраженная в единицах времени ширина импульсной характеристики на уровне 0.1 от ее высоты, и время нарастания сигнала с фотодиодов τ_r от нуля до максимума. Эти параметры также измерялись в экспериментах с использованием медного фильтра. Значения τ_r являлись исходными для определения толщины чувствительной области $p-i-n$ -диодов d_i по формуле [7]

$$d_i = \tau_r \cdot V_{\text{dh}}, \quad (2)$$

где V_{dh} — дрейфовая скорость дырок в кремнии.

Измеренные значения временного разрешения $\tau_{0.5}$ и $\tau_{0.1}$, времени нарастания сигнала τ_r и значение толщины чувствительной области d_i для четырех типов фотодиодов представлены в таблице.

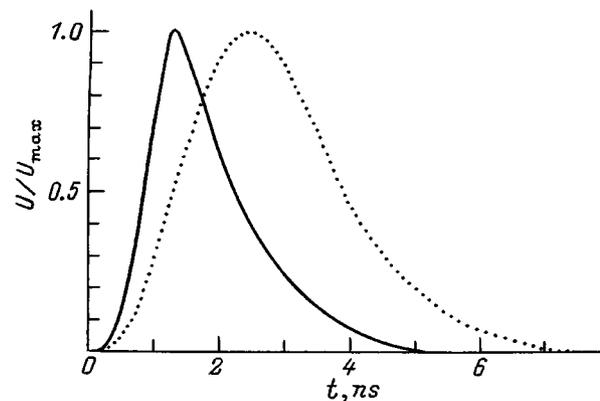


Рис. 1. Характерные формы сигналов, зарегистрированные фотодиодом СППД11-04 с использованием медного (сплошная линия) и алюминиевого (пунктир) фильтров.

Измерения спектральной чувствительности и расчеты спектральных характеристик фотодиодов

Как известно, спектральной чувствительностью $S(h\nu)$ кремниевого $p-i-n$ -фотодиода традиционно называется величина, связывающая ток фотодиода, выраженный в А, и мощность, выраженная в W, падающего на фотодиод монохроматического излучения. В предположении "двух-толщинной" модели $p-i-n$ -фотодиода его чувствительность $S(h\nu)$ в единицах А/W в МР диапазоне спектра может быть представлена в виде [2,7,9,10]

$$S(h\nu) = S_{\max} \exp(-\mu_c(h\nu)d_c) \exp(-\mu_{Si}(h\nu)d_d) \times [1 - \exp(-\mu_{Si}(h\nu)d_i)], \quad (3)$$

где d_c , d_d и d_i есть толщины контактного, "мертвого" и чувствительного слоев, поглощающих излучение; μ_{Si} и μ_c — линейные коэффициенты поглощения рентгеновского излучения в кремнии и материале контактного слоя соответственно; максимальная чувствительность S_{\max} есть величина, обратно пропорциональная энергии w образования электронно-дырочной пары в кремнии ($w = 3.64 \text{ eV}$ [8]), и для всех кремниевых фотодиодов имеет одинаковое, хорошо известное значение $S_{\max} = e/w = 0.275 \text{ A/W}$, где e есть элементарный заряд.

Следует отметить, что при введении таким образом чувствительности подразумевается, что энергия образования электронно-дырочной пары в кремнии не зависит от энергии в МР диапазоне спектра, а распределение чувствительности по поверхности активной области фотодиода известно [14].

В ряде практических случаев бывает удобно определять спектральную чувствительность как величину, связывающую ток фотодиода и плотность потока энергии излучения, выраженную в W/cm^2 , в плоскости установки фотодиода. Такая ситуация часто возникает в калибровочных экспериментах и при фотометрии различных импульсных плазменных объектов при использовании $p-i-n$ -фотодиодов с малыми площадями активной области, когда фотодиод полностью вписывается в калибровочный или исследуемый пучок фотонов. В этом случае спектральная чувствительность $S^*(h\nu)$ в единицах $\text{A} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ может быть выражена в виде

$$S^*(h\nu) = S_{\max}^* \exp(-\mu_c(h\nu)d_c) \exp(-\mu_{Si}(h\nu)d_d) \times [1 - \exp(-\mu_{Si}(h\nu)d_i)], \quad (4)$$

где S_{\max}^* есть величина, зависящая от площади a активной области фотодиода, которая в предположении равномерного распределения чувствительности по поверхности фотодиода записывается в виде

$$S_{\max}^* [\text{A} \cdot \text{cm}^2/\text{W}] = S_{\max} \cdot a = 0.275 \cdot a. \quad (5)$$

Для определения абсолютной чувствительности фотодиода в какой-либо спектральной точке МР диапазона

необходимо знать толщины поглощающих слоев и коэффициенты поглощения материалов слоев. Кроме того, в случае измерений плотности потока энергии МРИ быстрыми $p-i-n$ -фотодиодами, которые имеют малую площадь активной области и, вообще говоря, неизвестное распределение чувствительности по поверхности активной области, необходимо знать величину максимальной чувствительности S_{\max}^* . Коэффициенты поглощения известны практически для всех материалов [11]. Что касается толщин поглощающих слоев и значения S_{\max}^* , то они могут быть найдены из (4), если известны значения абсолютной чувствительности фотодиодов хотя бы в нескольких спектральных точках.

В настоящей работе измерения абсолютной чувствительности S_{\max}^* фотодиодов в ряде спектральных точек МР диапазона проводились в Физико-техническом институте на стенде и по методике, описанной ранее в работах [3,16,17]. Стенд включал лазерно-плазменный источник МРИ, фотоионизационный квантометр как первичный стандартный детектор и каналы монохроматизации на базе плоских и сферических многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) и тонкопленочных фильтров. Используемая нами методика позволяла измерять абсолютную чувствительность фотодиодов с точностью 15–20%, которая в основном определялась точностью абсолютных измерений потоков МРИ фотоионизационным квантометром [13,16].

Особенностью спектрально-селективных калибровок кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов в области энергии фотонов ниже 1000 eV является сильная зависимость чувствительности этих фотодиодов от энергии фотонов. Вследствие поглощения излучения в контактом и "мертвом" слоях чувствительность фотодиодов очень быстро падает с уменьшением энергии фотонов вплоть до энергии $\sim 100 \text{ eV}$ (L -край поглощения Si). Поэтому в спектральном интервале от 100 до примерно 300 eV проведение абсолютных спектрально-селективных калибровочных экспериментов весьма затруднено. Для получения большей интенсивности квазимонохроматического рентгеновского пучка на входе фотодиодов в вышеуказанном спектральном интервале нами использовались сферические МРЗ нормального падения. При этом за счет увеличения телесного угла сбора излучения лазерной плазмы удавалось достичь 20-кратного повышения плотности потока излучения на калибруемом $p-i-n$ -фотодиоде, что позволило прокалибровать фотодиоды MRD510 и СППД11-04. Однако даже с использованием сферических МРЗ имеющейся интенсивности МРИ было недостаточно, чтобы провести надежные спектрально-селективные калибровки фотодиодов S4753 и BRX65. Для того чтобы оценить абсолютную чувствительность этих фотодиодов, проводились сравнительные измерения сигналов с выходов фотодиодов S4753 и BRX65 и с фотодиода СППД11-04 при постановке всех трех детекторов за медным фильтром толщиной 0.46 μm .

Измеренные в ряде спектральных точек значения чувствительности фотодиодов MRD510 и СППД11-04 пред-

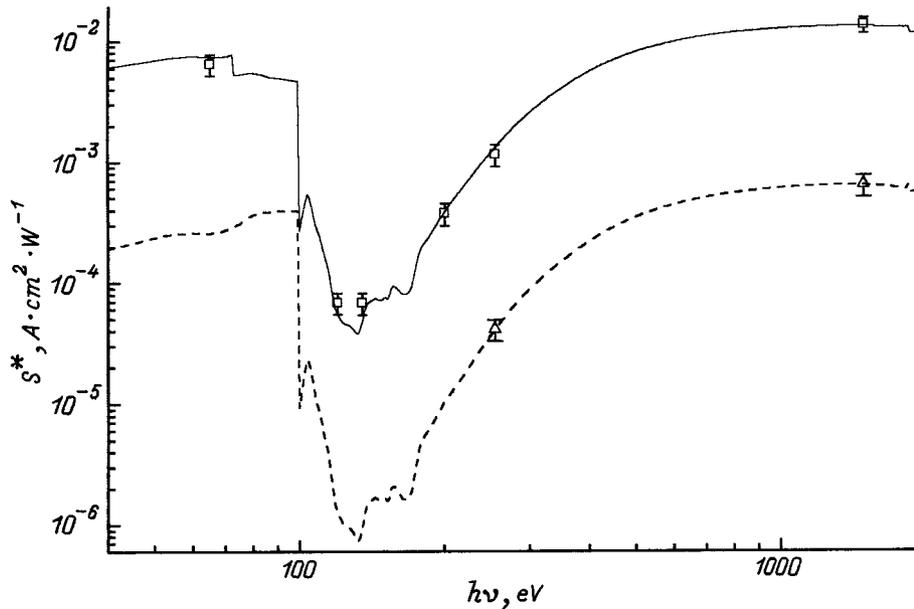


Рис. 2. Экспериментальные значения чувствительности и спектральные характеристики $p-i-n$ -фотодиодов СППД11-04 (—□—) и MRD510 (---Δ---).

ставлены на рис. 2. Здесь же показаны спектральные характеристики фотодиодов, рассчитанные по формуле (4). Значения величин S_{\max}^* и толщин поглощающих слоев d_d и d_c , определенные из экспериментально измеренных значений спектральной чувствительности, приведены в таблице. Здесь же представлены значения S_{\max} для данных детекторов, рассчитанные из формулы (5), в которой величины a взяты из паспортных данных для фотодиодов. Приведенные в таблице толщины поглощающих слоев фотодиодов S4753 и ВРХ65 оценены из сравнительных измерений, а значения S_{\max}^* получены по формуле (5) с использованием известного значения w и паспортных значений для a .

Обсуждение результатов

Экспериментально было обнаружено, что максимальное временное разрешение для фотодиодов MRD510 и S4753 (см. таблицу) достигается при напряжении питания +30 В, для фотодиода ВРХ65 — при +50 В, для фотодиода СППД11-04 — при +160 В. Эти значения были определены как оптимальные для данных типов фотодиодов. При увеличении напряжения питания свыше оптимального длительность сигналов с фотодиодов практически не менялась, в то время как при уменьшении напряжения питания наблюдалось значительное уширение сигналов с фотодиодов. При оптимальных напряжениях питания электрическое поле в фотодиодах возрастает до величины, при которой дрейфовые скорости носителей заряда в кремнии достигают максимальных значений, равных $V_{de} = 7.4 \cdot 10^6$ см/с для электронов и $V_{dh} = 4.8 \cdot 10^6$ см/с для дырок [26], и разделение

зарядов происходит за наименьшее время. Измерения при оптимальных значениях напряжения питания были взяты за основу при оценке толщины d_i чувствительной области фотодиодов, приведенной в таблице.

С точки зрения использования фотодиодов в экспериментах по исследованию временных процессов, протекающих в импульсной плазме в субнаносекундном временном диапазоне, наибольшими возможностями из исследовавшихся обладают фотодиоды S4753 и MRD510, имеющие максимальное временное разрешение при минимальных напряжениях питания. Однако их использование на источниках излучения с низкой интенсивностью может ограничиваться низкой чувствительностью в субкиловольтном спектральном диапазоне спектра. В качестве примера можно указать работу [21], где фотодиод MRD510 был использован для измерений с временным разрешением потоков МПИ плотной медно-алюминиевой плазмы. В данной работе удалось произвести измерения только в спектральном диапазоне энергий фотонов выше 350 эВ.

Наибольшей чувствительностью при достаточно высоком временном разрешении обладает фотодиод СППД11-04. Возможности данного фотодиода были продемонстрированы в ряде экспериментов по исследованию эволюции "горячих точек" в Z-пинчах [18–20]. В этих экспериментах были проведены измерения линейчатого и рекомбинационного излучения в спектральных интервалах от нескольких десятков [20] до тысячи [18,19] электрон-вольт.

Фотодиод ВРХ65 в сравнении с остальными из исследованных в настоящей работе фотодиодами имеет значительно худшее временное разрешение и низкую чувствительность в субкиловольтной области спектра и

поэтому может иметь лишь ограниченное применение для диагностики короткоживущей плазмы.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.К.Краснову и Г.С.Волкову за подготовку детектора СППД11-04 для измерений и за полезные консультации, а также Л.А.Шмаенку за стимулирование исследований и предоставленные для измерений образцы фотодиодов.

Работа была поддержана NATO Networking Infrastructure Grant (CN NIG 960544).

Список литературы

- [1] *Cuderman J.F., Glibert K.M.* // Rev. Sci. Instr. 1975. Vol. 46. P. 53–57.
- [2] *Hohlfelder J.J.* // Adv. in X-ray Analysis. 1973. Vol. 17. P. 531–541.
- [3] *Альбинов З.А., Белик В.П., Бобашев С.В.* и др. // Диагностика плазмы / Под ред. М.И.Пергамента. Вып. 6. М.: Атомиздат, 1989. С. 48–52.
- [4] *Renner O., Krousny E., Pina L.* // Czech. J. Phys. 1992. Vol. 42. P. 1–9.
- [5] *Jach T., Cowan P.L.* // Nucl. Instr. and Meth. 1983. Vol. 208. P. 423–426.
- [6] *Fiedorowicz H., Parys P., Ryc L.* // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1140. P. 91–94.
- [7] *Pina L.* // Czech. J. Phys. 1985. Vol. A35. P. 363–367.
- [8] *Corallo D.M., Creek D.M., Murray G.M.* // J. Phys. E. 1980. Vol. 13. P. 623–626.
- [9] *Scholze F., Rabus H., Ulm G.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 2974–2976.
- [10] *Tegeler E.* // Physica Scripta. 1990. Vol. T31. P. 215–222.
- [11] *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* // At. Data Nucl. Data Tables. 1993. Vol. 54. P. 181–342.
- [12] *Rabus H., Persch V., Ulm G.* // Appl. Optics. 1997. Vol. 36. P. 5421–5440.
- [13] *Bobashev S.V., Shmaenok L.A.* // Rev. Sci. Instr. 1981. Vol. 51. P. 16–20.
- [14] *Gullikson E.M., Korde R., Canfield L.R.* et al. // J. Electr. Spectr. Rel. Phenom. 1996. Vol. 80. P. 313–316.
- [15] *Krumrey M. and Tegeler E.* // rev. Sci. Instr. 1992. Vol. 63. P. 797–801.
- [16] *Bobashev S.V., Volkov G.S., Golubev A.V.* et al. // Physica Scripta. 1991. Vol. 43. P. 356–366.
- [17] *Бобашев С.В., Голубев А.В., Мосеян Д.А.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 10. С. 62–73.
- [18] *Hebach M., Simanovskii D., Bobashev S.* et al. // Plasma Sourc. Sci. Technol. 1993. Vol. 2. P. 296–300.
- [19] *Krejci A., Raus J., Piffel V.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1993. Vol. 21. P. 584–587.
- [20] *Golubev A.V., Krejci A.* Soft-X-rays of Nitrogen Z-pinch. Res. Rep. IPPCZ-352. Prague, 1995. 18 p.
- [21] *Сорокин А.А., Шмаенок Л.А., Белик В.П.* и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 4. С. 15–24.
- [22] *Pivinskii E., Akulinichev V., Gorbunov V.* // Proc. SPIE. 1997. Vol. 2986. P. 231–238.
- [23] *Акулиничев В.В., Мавричев М.Е., Пивинский Е.Г.* // Опт. и спектр. 1994. Т. 76. С. 681–684.
- [24] *Новицкий Л.А., Степанов Б.М.* // Фотометрия быстропротекающих процессов. М.: Машиностроение, 1983. 296 с.
- [25] *Stradling G.L., Attwood D.T., Kauffman R.L.* // IEEE J. Quantum Electron. 1983. Vol. QE-19. P. 604–615.
- [26] Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Под ред. Ю.К.Акимова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.