

УДК 621.383 + 535–34]: 533.9.082

© А. В. Голубев, В. В. Акулиничев

КРЕМНИЕВЫЕ P–I–N ФОТОДИОДЫ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКИ КОРОТКОЖИВУЩЕЙ ПЛАЗМЫ

В работе дано краткое описание методики исследования временных и спектральных характеристик детекторов мягкого рентгеновского излучения в интервале энергий фотонов от нескольких десятков до тысячи электронвольт. 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 ($40 \text{ eV} < h\nu < 6000 \text{ eV}$) начиная с 70-х годов [1]. За это время появилось много экспериментальных работ, в которых использовались как специально разработанные для МР-диапазона спектра фотодиоды (например, см. [2–4]), так и фотодиоды, изначально созданные для видимого диапазона спектра (например, см. [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.

Измерение параметров фотодиодов в МР-диапазоне спектра является самостоятельной и серьезной научно-технической задачей.

1. ПОДГОТОВКА ФОТОДИОДОВ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МР-ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Для исследования параметров были взяты коммерческие фотодиоды трех фирм: ВРХ65 (Siemens), MRD510 (Motorola), S4753 (Hamamatsu), предлагаемые производителями для детектирования видимого излучения, а также один экземпляр специально разработанного в НИИИТ (г. Москва) рентгеновского p–i–n фотодиода СППД11-04.

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 i-области — менее 80 μm .

На базе имеющихся фотодиодов были собраны детекторы МР-излучения (МРИ). Для этого каждый фотодиод помещался в корпус из нержавеющей стали, а его вывод припаивался к коаксиальному пятидесятиомному разъему. 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 плазмы.

Для выделения из спектра излучения плазмы требуемого МР диапазона и в то же время для предотвращения регистрации паразитного видимого и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучений 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 . 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 [7]. Расчеты показали, что фильтр из меди позволял выделить преимущественно излучение в спектральном диапазоне от 500 eV до 933 eV, где пропускание фильтра составляло 10–35 %, фильтр из серебра позволял выделить излучение в спектральном диапазоне от 100 eV до 400 eV, где пропускание составляло 5–15 %, а фильтр из алюминия — в низкоэнергетическом диапазоне от 20 eV 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. 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} %.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

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 фото-

диода [8], возникающего как отклик на воздействие входного δ -импульса (< 0.2 ns) лазерного [8] или рентгеновского [3] излучения.

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 [9–11].

Лазерные импульсы имели длительность 0.12 ns и энергию ≈ 200 mJ, что обеспечивало плотность мощности сфокусированного на мишени излучения $\approx 10^{14}$ W/cm². Длительность лазерных импульсов, наиболее важной для наших измерений величины, контролировалась электронно-оптической фотохронографической камерой "Агат-СФ-1", имеющей временное разрешение около 3 ps. 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 [12] из соотношения:

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

В формуле (1) 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 — временные разрешения 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 [13]. 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 и временное разрешение ЭЛТ — $5 \cdot 10^{-11}$ s [12]. Измеряемые в эксперименте длительности сигналов с фотодиодов (в качестве примера на рис. 1 представлены характерные формы сигнала с детектора, собранного на основе фотодиода СПД11-04, с медным и алюминиевым

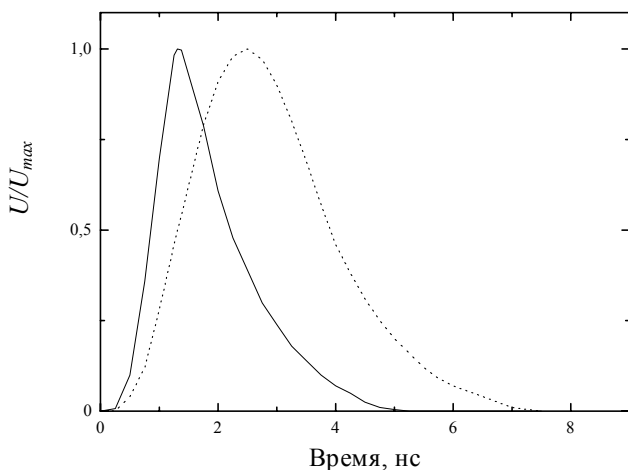


Рис. 1. Характерные формы сигналов, зарегистрированные фотодиодом СПД11-04 с использованием медного (сплошная линия) и алюминиевого (пунктирная линия) фильтров

фильтром 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 фильтров 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 толщин d_i чувствительной области р-і-п диодов по формуле [8]

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

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

Спектральные характеристики кремниевых р-і-п 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 і-области полупроводника. При этом для расчета чувствительности используется простая "двухтолщинная" модель р-і-п фотодиода [2, 9, 14, 15] и данные о коэффициентах поглощения в рентгеновской области спектра [7]. Спектральной чувствительностью $S(h\nu)$ кремниевое р-і-п фотодиода традиционно называется величина, связывающая ток фотодиода, выраженный в [А], и мощность, выраженную в [W], падающего на фотодиод монохроматического излучения. В предположении "двухтолщинной" модели р-і-п фотодиода его чувствительность $S(h\nu)$ в единицах [А/W] в МР-диапазоне спектра может быть представлена в виде [2, 9, 14, 15]:

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

где d_c , d_d и d_i есть толщины контактного, "мертвого" и чувствительного слоев, поглощающих излучение, а μ_{Si} и μ_c — линейные коэффициенты поглощения рентгеновского излучения в кремнии и материале контактного слоя соответственно. Максимальная чувствительность S_{\max} в (3) есть величина, обратно пропорциональная энергии w образования электронно-дырочной пары в кремнии ($w = 3.64$ eV [16]), и для всех кремниевых фотодиодов имеет одинаковое, хорошо известное значение $S_{\max} = e/w = 0.275$ А/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 [17].

В ряде практических случаев бывает удобно определять спектральную чувствительность как величину, связывающую ток фотодиода и плотность потока энергии излучения, выраженную в [W/cm²], в плоскости установки фотодиода. Такая ситуация часто возникает в калибровочных экспериментах и при фотометрии различных импульсных плазменных объектов при использовании р-і-п 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 [А · см²/W] может быть выражена в виде:

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

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

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

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 р-і-п 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 [7]. 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.

Абсолютная спектрально-селективная калибровка, вообще говоря, любого рентгеновского фотодиода осуществляется с применением первичного стандартного детектора [15, 17–19]. Кроме этого, известны способы абсолютной калибровки фотодиодов с использованием первичного стандарта излучения (например, синхротронного излучения (СИ)) [15], а также методом "самокалибровки" на источнике СИ [20]. При этом наиболее надежные и точные (погрешность < 1%) спектрально-селективные калибровочные измерения могут проводиться в настоящее время на источнике СИ при использовании криогенного болометра в качестве первичного стандарта [18]. Однако в случае калибровки быстрых р-і-п фотодиодов ее проведение на источнике СИ затруднено из-за малой по сравнению с размером пучка фотонов площади активной области таких фотодиодов и недостаточно высоким соотношением сигнал—шум на выходе р-і-п фотодиодов. На практике для измерения абсолютной чувствительности р-і-п фотодиодов

представляется удобным использование импульсного интенсивного (например, лазерно-плазменного) источника МРИ в комбинации с монохроматором на многослойных рентгеновских зеркалах и первичным стандартным детектором [11, 19, 21, 22], что реализовано и в настоящей работе.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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

Экспериментально было обнаружено, что максимальное временное разрешение для фотодиодов MRD510 и S4753 (см таблицу) достигается при напряжении питания +30 V, для фотодиода ВРХ65 — при +50 V, для фотодиода СППД11-04 — при +160 V. 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 [23], и разделение зарядов происходит за наименьшее время. Измерения при оптимальных значениях напряжения питания были взяты за основу при оценке толщин d_i чувствительной области фотодиодов, приведенной в таблице.

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

Параметры кремниевых р-і-п фотодиодов

Тип фотодиода	a (mm ²)	Напряжение смещения (V)	$\tau_{0.1}$ (ns)	$\tau_{0.5}$ (ns)	τ_r (ns)	d_i (μm)	d_c (μm)	d_d (μm)	S_{\max}^* (A·cm ² /W)	S_{\max} (A/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
ВРХ65	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

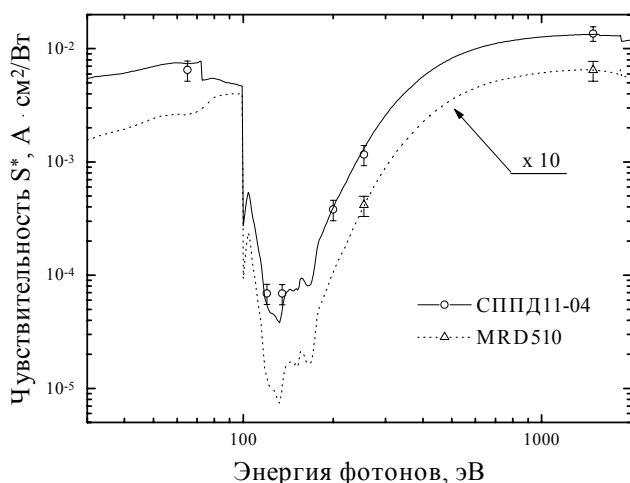


Рис. 2. Экспериментальные значения чувствительности и спектральные характеристики р-і-п фотодиодов СППД11-04 (сплошная линия) и MRD510 (пунктир)

значений спектральной чувствительности, приведенные 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 измерений их интегральной чувствительности за медным фильтром, а значения S_{\max}^* получены по формуле (5) с использованием паспортных значений для a .

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 [24], где фотодиод MRD510 был использован для измерений с временным разрешением потоков МРІ плотной медно-алюминиевой плазмы. В данной работе удалось произвести измерения только в спектральном диапазоне энергий фотонов свыше 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 [25–27]. В этих экспериментах

были проведены измерения линейчатого и рекомбинационного излучений в спектральных интервалах от нескольких десятков [27] до тысячи [25, 26] электрон-вольт.

Фотодиод ВРХ65 в сравнении с остальными исследованными 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cuderman J.F., Glibert K.M. // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. P. 53–57.
2. Hohlfelder J.J. // Adv. in X-ray Analysis. 1973. V. 17. P. 531–541.
3. Альбинов З.А., Белик В.П., Бобаев С.В. и др. // Диагностика плазмы. / Под ред. М.И. Пергамента. М.: Атомиздат, 1989. Вып. 6. С. 48–52.
4. Renner O., Krousky E., Pina L. // Czech. J. Phys. 1992. V. 42. P. 1–9.
5. Jach T., Cowan P.L. // Nucl. Instrum. and Meth. 1983. V. 208. P. 423–426.
6. Fiedorowicz H., Parys P., and Ryc L. // Proc. SPIE. 1989. V. 1140. P. 91–94.
7. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. // At. Data Nucl. Data Tables. 1993. V. 54. P. 181–342; http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/.
8. Pina L. // Czech. J. Phys. 1985. V. A35. P. 363–367.
9. Pivinskii E., Akulinichev V., Gorbunov V. // Proc. SPIE. 1997. V. 2986. P. 231–238.
10. Акулиничев В.В., Мавричев М.Е., Пивинский Е.Г. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76. С. 681–684.
11. Голубев А.В., Сорокин А.А., Пивинский Е.Г. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69, № 5. С. 83–88.
12. Новицкий Л.А., Степанов Б.М. Фотометрия быстропротекающих процессов. М.: Машиностроение, 1983. 296 с.
13. Stradling G.L., Attwood D.T., Kauffman R.L. // IEEE J. Quantum Electron. 1983. V. QE-19. P. 604–615.
14. Corallo D.M., Creek D.M., Murray G.M. // J. Phys. E. 1980. V. 13. P. 623–626.
15. Tegeler E. // Physica Scripta. 1990. V. 31. P. 215–222.
16. Scholze F., Rabus H., Ulm G. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 2974–2976.
17. Gullikson E.M., Korde R., Canfield L.R. et al. // J. Electr. Spectr. Rel. Phenom. 1996. V. 80. P. 313–316.
18. Rabus H., Persch V., Ulm G. // Appl. Optics. 1997. V. 36. P. 5421–5440.

19. Bobashev S.V. and Shmaenok L.A. // Rev. Sci. Instrum. 1981. V. 51. P. 16–20.
20. Krumrey M. and Tegeler E. // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. P. 797–801.
21. Bobashev S.V., Volkov G.S., Golubev A.V. et al. // Physica Scripta. 1991. V. 43. P. 356–366.
22. Бобашев С.В., Голубев А.В., Мосеян Д.А. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65, № 10. С. 62–73.
23. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Под ред. Акимова Ю.К. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
24. Сорокин А.А., Шмаенок Л.А., Белик В.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22, № 4. С. 15–24.
25. Hebach M., Simanovskii D., Bobashev S. et al. // Plasma Sourc. Sci. Technol. 1993. V. 2. P. 296–300.
26. Krejci A., Raus J., Piffel V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1993. V. 21. P. 584–587.
27. Golubev A.V. and Krejci A. // Soft-X-rays of Nitrogen Z-pinch, Research Report IPPCZ-352. Prague, 1995. 18 p.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

Материал поступил в редакцию 31.10.2000.

SILICON P-I-N PHOTODIODES FOR X-RAY DIAGNOSTICS OF SHORT-LIVED PLASMA

A. V. Golubev, V. V. Akulinichev

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The paper presents a brief outline of a method for studying temporal and spectral characteristics of soft X-ray detectors in the photon energy range from several tens to a thousand of electron-volts. The measured characteristics (signal rise time, temporal resolution, absolute spectral sensitivity) are given as well as parameters calculated from the measured data (thicknesses of contact, "dead", and sensitive layers) of some types of fast silicon p-i-n photodiodes from different manufacturers (Siemens; Hamamatsu; Motorola; RIIT, Moscow), which may be used in the instrumentation for X-ray plasma diagnostics with a temporal resolution of 1 ns and better.