

09

Многоканальные детекторы вакуумно-ультрафиолетового излучения на основе волоконно-оптических пластин и люминофоров

© А.П. Шевелько

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: apshev51@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2025 г.

Принято к публикации 28 сентября 2025 г.

Разработаны различные модификации вакуумно-ультрафиолетовых (ВУФ) детекторов излучения, которые включали в себя открытые ПЗС (приборы с зарядовой связью) и ПЗС с одной и двумя волоконно-оптическими пластинами. На внешнюю поверхность детекторов наносился слой люминофора Р-43 ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$). Чувствительная поверхность таких детекторов может иметь сложную, в том числе фигурную, форму. В видимом диапазоне спектра исследовано пространственное разрешение, в ВУФ-области спектра (диапазон длин волн $\lambda = 4.9\text{--}13.5\text{ nm}$) измерена абсолютная чувствительность детекторов. Рассмотрены условия оптимального использования детекторов в ВУФ- и рентгеновских спектрометрах.

Ключевые слова: волоконная оптика, люминесцентные детекторы, ВУФ- и рентгеновские спектрометры.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62178.20499

В последнее время интенсивно развиваются и используются различные многоканальные детекторы, в том числе детекторы на основе ПЗС (ПЗС — приборы с зарядовой связью). Особый интерес представляет применение таких детекторов как приборов реального времени в вакуумно-ультрафиолетовых (ВУФ) и рентгеновских спектрометрах. В настоящее время ПЗС-детекторы можно условно разделить на две группы: детекторы с „прямой“ регистрацией и детекторы с обратной засветкой. Последние обладают более высокой чувствительностью в ВУФ-диапазоне спектра. Но главный их недостаток состоит в том, что они имеют плоскую чувствительную поверхность, что в ряде случаев неприемлемо, например при регистрации спектров на сложных фокальных поверхностях: круге Роуленда в спектрометрах скользящего падения, в кристаллических фокусирующих спектрометрах (см., например, [1]). Так называемые „прямые“ ПЗС-детекторы более доступны и находятся в значительно более низкой ценовой категории. Однако из-за наличия на поверхности технологического слоя эти детекторы не могут непосредственно использоваться для регистрации ВУФ-излучения, так как этот технологический (так называемый „мертвый“) слой обладает очень большим поглощением излучения. Для использования этих детекторов в ВУФ-диапазоне спектра применяется слой люминофора, который трансформирует ВУФ-излучение в видимое, а видимое излучение уже регистрируется „прямым“ ПЗС-детектором (см., например, обзор [2]). Дополнительное соединение ПЗС с волоконно-оптическими пластинами позволяет изготавливать более сложную, в том числе фигурную, конфигурацию чувствительной поверхности (цилиндрическая, сферическая и т.д.) по сравнению с плоской поверхностью ПЗС с обратной засветкой. В настоящей

работе для достижения этой цели разработаны различные модификации детекторов ВУФ-излучения на основе ПЗС с „прямой“ регистрацией, волоконно-оптических пластин (ВОП) и люминофоров и измерены их характеристики.

Разработанные детекторы состоят из трех элементов. Разберем параметры каждого из них. В качестве детектора видимого излучения использовался линейный ПЗС-детектор Toshiba TCD 1304. Этот детектор обладает компактными размерами ($42 \times 10 \times 3\text{ mm}$), содержит большое число элементов (3648 пикселей) размером $6 \times 200\text{ }\mu\text{m}$. Малый период активной части ($8\text{ }\mu\text{m}$) позволяет достигнуть высокого пространственного разрешения. Детектор имеет высокую чувствительность в видимой области спектра с максимумом на длине волны $\lambda = 550\text{ nm}$.

В качестве люминофора был выбран мелкодисперсионный порошок (марка Р-43, формула $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) со средним размером гранул $d \sim 3.0\text{ }\mu\text{m}$. Этот люминофор обладает высоким квантовым выходом в ВУФ-области спектра и имеет максимум спектрального выхода на длине волны 540 nm , хорошо согласованный с максимумом чувствительности ПЗС-детектора. Для регистрации ВУФ-излучения с максимальным пространственным разрешением выбрана толщина слоя люминофора $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$.

Использовались три базовые модификации детекторов. В первой (А) слой люминофора наносился непосредственно на чувствительные элементы ПЗС, во второй (В) — на ВОП, соединенную с ПЗС, в третьей (С) — на дополнительную ВОП, соединенную с ПЗС и ВОП (рис. 1). Эта ВОП может иметь сложную фигурную форму. Данные модификации позволяют регистрировать излучение как в ВУФ-, так и в рентгеновской области спектра. Все модификации имели ВОП с диаметром

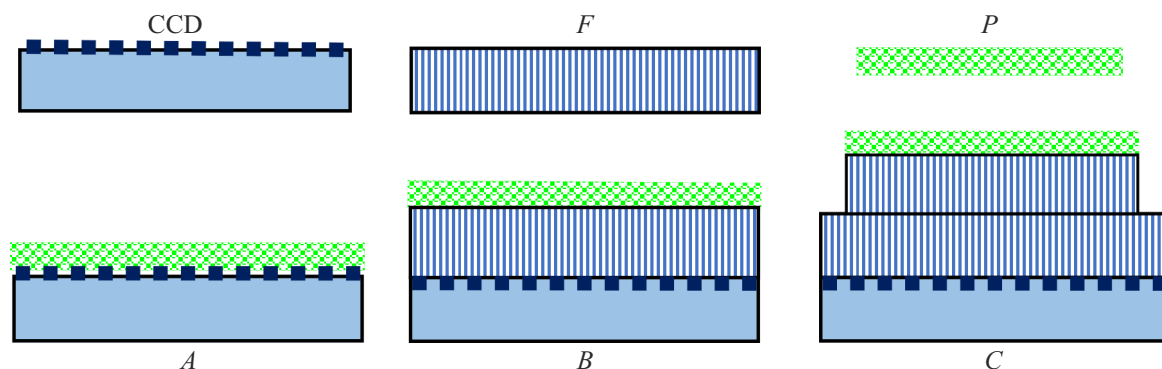


Рис. 1. Базовые модификации разработанных ПЗС-детекторов. *A* — ПЗС+слой люминофора; *B* — ПЗС+ВОП+слой люминофора; *C* — ПЗС+ВОП+ВОП+слой люминофора. Обозначения: CCD — ПЗС, *F* — ВОП, *P* — слой люминофора.

волокна $6\text{ }\mu\text{m}$. Пластины соединялись друг с другом на оптическом контакте.

Измерения пространственного разрешения детекторов проведены с использованием видимого (зеленого) света. Такой подход основан на том, что ВУФ-излучение поглощается в очень узком слое люминофора (при размере гранул люминофора $\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ уже полностью в первом слое). Этот слой люминесцирует в видимом свете (в зеленом свете для люминофора Р-43), излучение проходит через слой люминофора и затем регистрируется ПЗС-детектором. Это позволяет исследовать пространственное разрешение, используя видимое излучение вместо ВУФ-излучения, что значительно упрощает процедуру измерений. Измерения проводились в зеленом свете. Источником света служила светодиодная лампа, которая подсвечивала спектральную щель УФ-2. Изображение щели передавалось с помощью микрообъектива с большим уменьшением на вход детектора. При переносе изображения щели на плоскость детектора ширина изображения щели была много меньше размера пикселя, канала ВОП ($\sim 6\text{ }\mu\text{m}$) или гранул люминофора ($\sim 3\text{ }\mu\text{m}$), т.е. на исследуемый детектор практически проецировалась δ -функция. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Учитывая, что пространственное разрешение ПЗС-детектора без слоя люминофора составляет 2 пикселя ($16\text{ }\mu\text{m}$), приходим к следующим выводам. Нанесение люминофора на открытый ПЗС-детектор ухудшает разрешение в 1.5 раза. Переход от модификации *A* к модификациям *B* и *C* ухудшает разрешение в 1.3 раза.

Таблица 1. Пространственное разрешение Δ (ширина по полувысоте) различных модификаций детекторов (в пикселях и μm)

Модификация	Обозначение	Δ	
		pixel	μm
<i>A</i>	ПЗС+слой люминофора	3	24
<i>B</i>	ПЗС+ВОП+слой люминофора	4	32
<i>C</i>	ПЗС+2 ВОП+слой люминофора	4	32

Абсолютная калибровка чувствительности детекторов проводилась с помощью экспериментальной установки на основе ВУФ-источника излучения, монохроматора и измерительной камеры [3]. В качестве источника излучения использовалась плазма газонаполненного капиллярного разряда со следующими параметрами: основные разрядные емкости 20 nF, межэлектродное напряжение 35 kV, ток 25 kA, длительность импульса 20 ns. Наполнение газом керамического капилляра длиной 10 mm и диаметром 2 mm происходило с помощью электромагнитного клапана. В качестве рабочего газа использовались инертные газы Ne, Ar и Xe при давлении 100–500 mTorr. Температура электронов плазмы составляла $T_e \sim 60\text{ eV}$, что позволяло возбуждать спектры в зависимости от используемого газа в диапазоне длин волн $\lambda = 4.9\text{--}13.5\text{ nm}$. Этот источник излучения располагался на расстоянии 50 mm от входной щели ВУФ-монохроматора скользящего падения с постоянным углом отклонения (14°). Сканирование по длинам волн осуществлялось с помощью прецизионного поворота сферической ($R = 1\text{ m}$) дифракционной решетки (600 lines/mm). На выходе монохроматора устанавливалась специальная двухканальная камера (рис. 2) с калиброванным детектором излучения и испытываемым детектором. Интенсивность излучения, прошедшего через выходную щель, регистрировалась с помощью абсолютно калиброванного PIN-диода AXUV-100. Рядом располагался испытываемый детектор. Заметим, что этот метод калибровки не зависит от коэффициента отражения дифракционной решетки. Важным является только, чтобы освещенность по высоте выходной щели монохроматора была одинаковой в двух каналах. Идентичность каналов регистрации контролировалась для каждой используемой длины волны с помощью поворота испытательной камеры на 180° .

Измерения абсолютной чувствительности детекторов проводились на длинах волн, максимально приближенных к используемым в приложениях по коротковолновой проекционной нанолитографии (см., например, [4,5]). Для этого использовались следующие переходы: $2p\text{--}3s$ в ионе Ar IX ($\lambda = 4.9\text{ nm}$), $2p\text{--}4d$, $4s$ в ионе Ne VIII

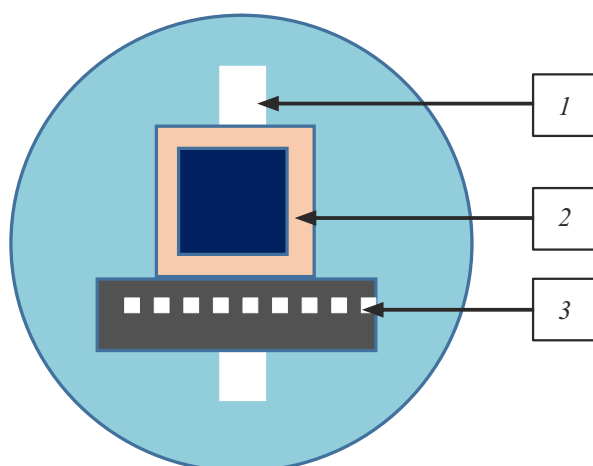


Рис. 2. Испытательная камера на выходе ВУФ-монохроматора с абсолютно калиброванным PIN-диодом AXUV-100 и испытываемым детектором. 1 — выходная щель, 2 — AXUV-100, 3 — тестируемый детектор.

($\lambda = 7.4 \text{ nm}$), $4d-4f$, $5f$ в ионе Xe XII ($\lambda = 10.8 \text{ nm}$), $4d-5p$ в ионе Xe XI ($\lambda = 13.5 \text{ nm}$). Для отождествления спектральных переходов использовались работы [6,7]. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Ошибка измерений определялась разбросом экспериментальных данных и составляла $\sim 15\%$. Относительные величины чувствительности Y различных модификаций детекторов хорошо „скалируются“ как $A : B : C = 1 : 9 : 33$. Зависимость Y от длины волны λ для всех модификаций имеет вид $Y \sim 1/\lambda \sim \hbar\omega$.

В заключение приведем некоторые рекомендации по установке разработанных детекторов в спектрометры. Из табл. 1 следует, что максимальная эффективность достигается в модификации A, когда слой люминофора напыляется непосредственно на чувствительные элементы ПЗС-детектора. Однако такая модификация имеет плоскую чувствительную поверхность. Если в процессе работы требуется часто заменять слой люминофора, например при его повреждении или деградации при воздействии интенсивного ВУФ-излучения, рекомендуется применять модификацию ПЗС с одной ВОП, на которую наносится слой люминофора (модификация B). При необходимости этот слой можно удалить и нанести другой. Если фокальная поверхность представляет собой

сложную форму, лучше использовать модификацию ПЗС с двумя ВОП (модификация C). При этом внешняя поверхность второй ВОП, на которую наносится слой люминофора, может иметь сложную фигурную форму, например цилиндрическую или сферическую, в том числе с малым радиусом кривизны. Это позволяет совместить фокальную поверхность спектрометра и чувствительный слой детектора, что обеспечивает максимальное спектральное разрешение. Это невозможно осуществить при использовании детекторов с плоской чувствительной поверхностью.

Как следует из табл. 2, соединение ПЗС с дополнительными ВОП приводит к существенному падению эффективности детекторов. Особенно это относится к модификации C. Однако возможность совмещения чувствительной поверхности детекторов и фокальной поверхности спектрометров может значительно компенсировать эти потери. В этом и состоит новизна этой модификации, которая по существу представляет собой новый класс детекторов для их использования в ВУФ- и рентгеновских спектрометрах. На использование фигурных, сложной формы ВОП в таких детекторах выдан патент РФ [8].

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-79-30086-П).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.B. Wittry, N.C. Barbi, *Microsc. Microanal.*, **7**, 124 (2001). DOI: 10.1007/s100050010080
- [2] M. Nikl, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R37 (2006). DOI: 10.1088/0957-0233/17/4/R01
- [3] A.P. Shevelko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1115**, 022041 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1115/2/022041
- [4] J. Beckers, T. van de Ven, R. van der Horst, D. Astakhov, V. Banine, *Appl. Sci.*, **9**, 2827 (2019). DOI: 10.3390/app9142827
- [5] N.I. Chkhalo, K.V. Durov, A.N. Nechai, A.A. Perekalov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, *J. Surf. Investig.*, **17** (Suppl. 1), S226 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070078
- [6] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало, *Оптика и спектроскопия*, **129** (3), 266 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.03.50652.282-20 [A.N. Nechai, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, *Opt. Spectrosc.*, **129**, 363 (2021). DOI: 10.1134/S0030400X21030127].
- [7] R.L. Kelly, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **16** (Suppl. 1), 1 (1987).
- [8] А.П. Шевелько, *Детектор вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения*, патент РФ 2836133 (опубл. 11.03.2025).

Таблица 2. Абсолютная чувствительность Y (в $\text{photon}/(\text{count} \cdot \mu\text{m}^2)$) детекторов различных модификаций

Длина волны λ , nm	Модификация		
	A	B	C
4.9	0.002	0.018	0.067
7.4	0.003	0.026	0.092
10.8	0.0043	0.04	0.14
13.5	0.006	0.053	0.20