Известия НАН Армении, Физика, т.57, №3, с.424–435 (2022)

УДК 535-31 DOI:10.54503/0002-3035-2022-57.3-424

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КРИСТАЛЛОВ КОРУНДА С РАЗЛИЧНЫМИ АКТИВИЗИРУЮЩИМИ АГЕНТАМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УФ ДЕТЕКТОРОВ ДЛИН ВОЛН 50–400 НМ

## С.А. МХИТАРЯН<sup>1</sup>, ДЖ.Г. ВАРДАНЯН<sup>1\*</sup>, Г.С. АГАДЖАНЯН<sup>1</sup>, М.Н. НЕРСИСЯН<sup>2</sup>, А.Р. МНАЦАКАНЯН<sup>1</sup>, А.П. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>, М.А. ОГАННИСЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения <sup>2</sup>Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

\*e-mail: julia.vardanyan2011@yandex.com

(Поступила в редакцию 1 февраля 2022 г.)

Проведены исследования сцинтилляционных характеристик и оптических свойств кристаллов корунда с различными активизирующими агентами, на основе которых выбраны кристаллы с оптимальными параметрами для разработки и создания монокристаллических интегральных и матричных координатно-чувствительных широкополосных УФ детекторов в диапазоне 50–400 нм. При определенных частотах облучения кристаллов корунда с различными легирующими примесями, проведены спектральные измерения их люминесценции и поглощения и определены оптимальные составы и концентрации примесей. Исследованы также спектры поглощения некоторых выбранных образцов корунда в зависимости от условий термического отжига. Выявлены и разделены резонансные линии, соответствующие каждому конкретному легирующему элементу. Изучены роли легирующих примесей в формировании общего спектра поглощения и оценены возможности принудительного формирования желаемого спектра поглощения в диапазоне интересующих длин волн.

#### 1. Введение

Спектральный диапазон ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения является важной областью для экспериментальных исследований в области естественных наук и материаловедения. Для проведения таких исследований, в частности, для множества космических и астрономических исследований, в том числе для исследования физики Солнца (диапазоны длин волн 10–200 нм), связи и обнаружения ракет (280 нм) и атмосферных исследований (200–400 нм), широко используются различные УФ детекторы [1].

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к оптическим датчикам, в том числе и к УФ детекторам, являются компактность, чувствительность, долговечность, тепловая и радиационная устойчивость и надежность, которые зависят от чувствительности, компактности, устойчивости и надёжности используемых в этих детекторах УФ преобразователей и, следовательно, от характеристик применяемых в них чувствительных кристаллов.

Для создания чувствительных преобразователей УФ детекторов могут быть использованы кристаллы корунда (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с различными примесями, которые по своим основным параметрам значительно превосходят многим другим кристаллам.

Оптические датчики на основе кристаллов корунда широко известны и могут быть использованы в условиях высоких температур, давлении, радиации и т.д. По существу, корунд химически инертен, и отличный материал в оптическом отношении. В частности, он имеет высокий внутренний коэффициент пропускания на длинах волны от дальнего УФ до среднего инфракрасного (от 50 нм до 6000 нм). В видимом диапазоне длин волн он имеет высокий показатель преломления (1.77), что приводит к низким потерям излучения. Корунд обладает двойным лучепреломлением, причем его показатель преломления зависит как от поляризации, так и от направления падающего света. Он сохраняет свою структурную целостность при температурах до 1600–1700°С, а при повышении температуры чуть выше 2000°С, становится все более пластичным и плавится.

В работах [2–4] опубликованы результаты исследований многих кристаллов для изучения и определения их пригодности в применении в УФ детекторах, при которых использовались различные известные методы исследования УФ-лучей [5–11]. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что определенные образцы кристаллов корунда могут быть использованы для разработки и создания чувствительных, гибких, термостойких, компактных и устойчивых к радиационным и температурным изменениям УФ преобразователей и детекторов [2–4].

Продолжая исследования различных кристаллов корунда с определенными активизирующими примесями (активаторы, агенты), были выбраны те кристаллы, параметры которых максимально соответствовали требованиям создания чувствительных УФ преобразователей, как для интегральных УФ детекторов с прямым измерением интегрального излучения, так же и для координатно-чувствительных УФ детекторов с пространственным разрешением и построением изображения. Причем, для создания интегрального УФ детектора предлагается использовать монокристалл корунда, а для получения координатно-чувствительного УФ детектора – матрица-связка из волоконных кристаллов корунда.

Как известно, при создании координатно-чувствительных детекторов для видимой части спектра [5,6] наиболее широко применяются так называемые приборы с зарядовой связью – ПЗС (ССD) на основе матриц кристаллов кремния [12– 15], которые не обладают приемлемой чувствительностью для УФ и ВУФ диапазона (50–400 нм). Следовательно, при обеспечении необходимых показателей, кристаллы корунда могли бы быть успешно использованы также для создания матриц-связок волокон, пригодных для создания координатно-чувствительных преобразователей и детекторов УФ диапазона. В целом, настоящая работа посвящена представлению этих экспериментальных исследований и результатов изучения свойств кристаллов корунда, а также обоснованию их выбора для создания различных УФ детекторов.

#### 2. Экспериментальные исследования

С целью создания чувствительных преобразователей для УФ детекторов с улучшенными характеристиками в области 50–400 нм, проведены исследования кристаллов корунда с различными примесями, для их сертификации и выбора образцов с наилучшими параметрами. При выполнении этих работ использованы следующие методы, подходы и технические особенности:

- метод оптико-механической обработки кристаллов для создания образцов из монокристалла були,
- оптический метод разделения-идентификации дефектов и концентрации пузырьков в кристалле,
- Х-рентгенофлуоресцентный метод определения элементного состава изучаемых образцов,
- метод отжига для модификации оптических свойств кристаллов,
- разработка новых и усовершенствование известных технологий получения, выбора и обработки кристаллов.

С целью проведения планированных экспериментальных работ, разработана и смонтирована многофункциональная установка для экспериментальных измерений абсорбционных и люминесцентных характеристик кристаллов в диапазоне 200–1000 нм на базе спектрометров SPECORDUV-VIS, M-400 и MPF-448, рентгенофлуоресцентного анализатора, сцинтилляционного блока детектирования (БДС), фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), веб и цифровых камер, солнечных элементов, фотодиодов и специально разработанного и созданного анализаторадискриминатора, позволяющего автоматизировать сбор и обработку данных [2].

Для измерения интегральной интенсивности излучения использовались БДС, ФЭУ, фотодиоды и солнечные элементы. Для визуализации изображении в оптическом диапазоне использовались веб и цифровые камеры. Для записи импульсов использовались ФЭУ, веб-камеры, цифровые фотоаппараты и солнечные батареи. Оптические измерения и определения примесей и их концентрации были выполнены на рентгенофлуоресцентном спектрометре. Анализатор-дискриминатор был предназначен для получения статистического распределения по амплитуде электрических импульсов на выходе ФЭУ и мог работать как отдельное устройство, так же и совместно с системами КАМАК, NI и L-CARD, используя все их возможности визуализации, математической обработки и т.д.

Все измерения, обработка данных, а также быстрый доступ к оборудованию и к результатам анализа данных, выполнены с помощью программного обеспечения LabView. Затем на компьютере была проведена соответствующая математическая обработка, в результате чего были получены окончательные результаты распределения по амплитуде электрических импульсов на выходе ФЭУ. На основе проведенных измерений рассчитано количество пузырьков в единице объема исследованных кристаллов и оценены их оптические качества, что было первым важным критерием выбора кристаллов, пригодных для создания УФ преобразователей. Вторым критерием сертификации и выбора кристаллов для их дальнейших исследований, были наличие примесей и их концентрации в исследованных кристаллах. Причем доступность и контролируемость введения легирующих добавок, а также изменение структурных характеристик кристаллов с помощью их отжига и имплантации примесей, являются решающими и изменяемыми параметрами, определяющими люминесцентные качества кристаллов.

Для калибровки рентгенофлуоресцентного спектрометра с различными интервалами энергии, примененного для проведения необходимых нам оптических измерении и определения концентрации примесей в исследуемых кристаллах, были выбраны и использованы приведенные в Таблице 1 соединения и их смеси с различными соотношениями.

1.	Оксид алюминия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2.	Дихромат калия	$K_2Cr_2O_7$
3.	Бромид калия	KBr
4.	Молибдат кальция	CaMoO <sub>4</sub>
5.	Гексацианоферрат (III) калия	K <sub>3</sub> [Fe (CN) <sub>6</sub> ]
6.	Молибдат натрия	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>

Табл.1. Выбранные соединения для калибровки спектрометра

При проверке результатов калибровки, после смешивания двух солей K<sub>3</sub>[Fe (CN)<sub>6</sub>] и Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> в представленных в Таблице 2 весовых соотношениях, с помощью откалиброванного рентгенофлуоресцентного спектрометра, получены следующие результаты концентраций примесей и их ошибок.

Хотя результаты измерений для выбранных составов контрольных соединений были удовлетворительными, при измерениях на исследуемых кристаллах корунда результаты не повторялись. Проведенные исследования показали, что в спектрах флуоресценции таких образцов появляются лишние пики, энергии которых иногда значительно отличаются от энергий пиков составляющих химических элементов. А в некоторых случаях энергии лишних пиков частично или полностью покрывают пики элементов, что приводит к существенным ошибкам при определении состава кристаллов.

Для выяснения и устранения причин вышеуказанного явления, были проведены дополнительные исследования при вращении образцов вокруг своих осей, благодаря чему были выявлены и устранены возможные факторы, влияющие на измерения концентрации примесей [3]. Главный вывод из вышеизложенного состоит в том, что при исследовании монокристаллов, кроме флуоресцентных пиков могут регистрироваться также дифракционные, так называемые, «паразитные» пики.

Konnonant	Относительная	Ош. отн.	Отн. мол.	Ош. отн. мол.
Компонент	концентрация, %	конц., %	конц., %.	конц., %
K	59.97366	0.188524	72.49073	0.227871
Fe	22.03554	4.24×10 <sup>-2</sup>	18.64737	3.59×10 <sup>-2</sup>
Мо	17.9908	3.26×10 <sup>-2</sup>	8.861884	$1.61 \times 10^{-2}$

Табл.2. Полученные относительные концентрации и их ошибки после смешивания двух солей

После получения спектров интенсивности флуоресценции программой ADMSA на рентгенофлуоресцентном спектрометре, выбраны соответствующие элементы, а программное обеспечение XRS-FP преобразовало линии интенсивностей в концентрации этих элементов.

XRF-FP – это пакет программного обеспечения для количественного анализа рентгеновской флуоресценции (XRF анализ), который с использованием фундаментальных параметров (FP) преобразует интенсивности пиков элементов в их концентрации. Этот программный пакет обрабатывает необработанные рентгеновские спектры, измеренные с помощью детекторов и сигнальных процессоров спектрометра, для получения интенсивностей пиков флуоресценции, соответствующих каждому элементу и их концентрации.

Были исследованы также монокристаллические образцы кристаллов корунда с различными легирующими добавками, в рамках чего изучены их оптические свойства и получены спектры поглощения и люминесценции.

Сравнительные измерения интегральной интенсивности люминесценции кристаллов были проведены в лабораториях RAGEA в DESY (Германия) и рентгеновской оптики в центре «CANDLE» Lab (Армения), где в качестве источника УФ излучения использовали импульсную ксеноновую лампу (с частотой вспышек 1 Гц) после пропускания его лучей через фильтр UVC2. Проведенные сравнительные измерения, в частности, показали, что различия измеренных интегральных интенсивностей спектров люминесценции выбранных кристаллов составляют ~30% [2]. После этих измерений выбраны кристаллы (светло-розовый и желтый), обладающие хорошим поглощением оптического излучения в диапазоне длин волн 50–400 нм, как пригодные для использования при создании преобразователей УФ детекторов.

Полученные данные концентраций примесей для светло-розового кристалла показаны в Таблице 3, а их спектры поглощения и пропускания, на Рис.1 и Рис.2, причем для правильной идентификации спектров, измерения проводились при температурах жидкого азота.

Проведенные спектральные исследования показали, что полосы пропускания и поглощения выбранных кристаллов корунда в основном обусловлены центрами поглощения, которые в свою очередь в основном были обусловлены собственными структурными дефектами кристаллов, или наличием и концентрацией примесных ионов переходных металлов.



Рис.1. Спектр поглощения светло-розового кристалла корунда.



Рис.2. Спектр пропускания светло-розового кристалла корунда.

В частности, для светло-розового кристалла поглощение при 205 нм обусловлено центрами нейтральных атомов железа Fe, а при 250 нм и 280 нм – ионами железа Fe<sup>+</sup>.

Полученные данные концентраций примесей для выбранного желтого кристалла приведены в Таблице 4, а спектры его поглощения и пропускания – на Рис.3 и Рис.4, соответственно.

Табл.3. Данные относительной концентраций примесей светлорозового кристалла корунда

Элементы	Al, %	Ti, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Co, %	Cu, %	Zn, %
Св. Розовый	99.92875	0.011242	0.027139	0.000885	0.00658	0.010374	0.012847	0.002189

По результатам проведенных исследований, для желтого кристалла поглощение при 205 нм обусловлено центрами нейтральных атомов железа Fe (собственный дефект для данного кристалла); при 350 нм: Мп-примесь; при 500 нм: Fe- или Ni-примеси; а при 600 нм: Cr<sup>3+</sup>-примесь.

Компонент	Относительная концентрация, %	Ош. отн. конц., %	Отн. мол. конц., %.	Ош. отн. мол. конц., %
Al	99.30669	2.520314	99.70152	2.530334
Cr	3.936573×10 <sup>-2</sup>	2.261445×10 <sup>-3</sup>	0.0205086	$1.178159 \times 10^{-3}$
Fe	4.470679×10 <sup>-2</sup>	$1.802545 \times 10^{-3}$	$2.168588 \times 10^{-2}$	$8.743589 \times 10^{-4}$
Ni	3.833662×10 <sup>-2</sup>	3.257422×10 <sup>-3</sup>	0.0176935	$1.503398 \times 10^{-3}$
Zn	0.5442438	4.405858×10 <sup>-3</sup>	0.2254541	1.825136×10 <sup>-3</sup>
Mn	2.665233×10 <sup>-2</sup>	1.599558×10 <sup>-3</sup>	0.0131417	7.887086×10 <sup>-4</sup>

Табл.4. Данные относительной концентраций примесей желтого кристалла корунда



Рис.3. Спектр поглощения желтого кристалла.

Описанные предыдущие два метода исследований использовались только для сертификации и выбора кристаллов. После этого для изменения их оптических свойств использованы метод термического отжига. Термический отжиг и радиационное воздействие являются основными методами генерации дефектов в кристаллах, в частности, их структурных центров окраски. Они могут быть использованы для изменения и улучшения определенных свойств кристаллов, поэтому было решено попробовать изменить свойства исследованных образцов кристаллов путем их термического отжига. Для этой цели были выбраны три образца корунда с идентичными концентрациями, свойствами и их отжиг осуществлялся при температурах 300°C, 500°C и 1000°C [4].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что с повышением температуры отжига, ширина полосы поглощения и люминесценции кристаллов начинает уменьшаться немонотонно, т.е. при отжиге может происходить



Рис.4. Спектр пропускания желтого кристалла.

перезарядка или передача энергии кристаллической решетки, и наблюдается уменьшение полос поглощения во всем объеме образцов с разной скоростью и кинетикой. В любом случае, во время исследований отжиг менял оптические свойства кристаллов, притом вне зависимости от выбранных режимов (при диффузионной откачке, грязной среде), ухудшил оптические свойства кристаллов. Тем не менее, полученные результаты также указывают на то, что в дальнейшем, может быть, с помощью термического отжига, возможно, будет управлять оптическими свойствами кристаллов и получить положительные результаты, если бы образцы были бы другого качества и с большим набором дефектов–вакансий, дислокаций и примесей.

На основе проведенных исследовании воздействия отжига на характеристики кристаллов можно также сделать вывод, что примененные две критерии отбора кристаллов – наличие пузырьков и концентрация примесей, недостаточны, и надо оценивать также наличие напряженностей в кристаллах до и после отжига, т.е. оценивать изменение воздействия так называемых СЦОструктурных центров окраски на свойствах кристаллов. Для экспериментальной оценки пригодности выбранных кристаллов корунда и возможности создания УФ детекторов в диапазоне длин волн 50–400 нм, разработаны два типа детекторов люминесценции: с записью на ПЗС матрицу и с помощью приемника солнечных элементах.

С этой целью были исследованы также кристаллы белого корунда и лазерного рубина (natural) с разными концентрациями хрома (Таблица 5).

Для измерения интегральной относительной интенсивности люминесценции кристаллов, в качестве источника излучения использовался лазер с длительностью импульса ~100 фс и частотой 100 кГц, на длинах волн 400 нм и 266 нм. При этих экспериментах измерялся также мощность излучения после его прохождения через кристалл.

Элемент	Рубин (n), %	Корунд, %
Al	96.25	99.7
Sc	_	_
Ti	0.35	7.19×10 <sup>-14</sup>
V	0.17	_
Cr	0.34	3.37×10 <sup>-2</sup>
Fe	1.52	1.83×10 <sup>-2</sup>
Со	_	2.52×10 <sup>-2</sup>
Ni	0.14	_
Cu	8.24×10 <sup>-2</sup>	0.055
Zn	4.92×10 <sup>-2</sup>	—
Ga	0.04	_
As	_	0.125
Sr	_	_
Se	4.54×10 <sup>-2</sup>	_
Мо	_	_

Табл.5. Относительные концентрации элементов в рубине (n) и корунде (белый)

Полученные спектры люминесценции рубина с примесями хрома приведены на Рис.5, откуда видно, что исследованные величины максимальной спектральной чувствительности рубина изменялись в широком интервале длин волн, с тенденцией перехода с УФ в вакуумную часть спектра ВУ.

После анализа полученных данных (характеристик относительных спектральных чувствительностей, зависимостей фотолюминесценции от подающего



Рис.5. Люминесцентные спектры кристаллов рубина при накачке 380–600 нм:  $I - R_2$  линия, а  $2 - R_1$  линия излучения рубина с относительными концентрациями хрома: а -1.1%, b -0.09%, с -0.05%.

излучения, измерения квантового выхода и т.д.), был сделан вывод о пригодности исследованных кристаллов рубина, как чувствительного преобразователя УФ излучения в видимую область. Для экспериментальной проверки сделанных выводов, на основе исследованных и выбранных кристаллов, также был разработан и изготовлен макет интегрального детектора для диапазона длин волн 200–400*нм* с квантовым выходом ~0.9 [2].

С целью решения задачи разработки и создания координатно-чувствительных УФ детекторов с пространственным разрешением на основе исследованных кристаллов, в качестве конвертора- преобразователя была создана матрицасвязка из восьми выбранных волокон-кристаллов корунда [3]. С этой целью в качестве структурированного сцинтилляционного тонкокристаллического материала изначально был выбран кристалл корунда, выращенный методом LHPG (LaserHeatedPedestalGrowth), который позволяет получать оптически более чистые кристаллы. Причем, использование тонкокристаллических сцинтилляторов дает высокое разрешение, но низкую чувствительность, и в каждом конкретном случае необходимо делать оптимальный выбор.

Для изготовления связки кристаллов-матриц УФ преобразователей, использованы тонкие полоски выбранных образцов кристаллов корунда с толщиной ~0.2 мм и более, и из этих пластин корунда были механической обработкой получены волокна с размерами  $0.2 \times 0.2 \times 2.5$  мм<sup>3</sup>. После изготовления отдельных элементов-волокон, они также были отполированы (механически и химически), покрыты соединительным материалом (никель, медь, серебро, платина и др.), «связаны вместе» и разрезаны на пластины-связки. В целом, были изготовлены около 100 образцов волокна корунда сечением  $0.2 \times 0.2 \times 2.5$  мм<sup>3</sup>.

В ходе выполнения данной работы также была отлажена цепочка следующих операций:

- формирование непрерывных цилиндрических каналов во вспомогательной молибденовой матрице;
- заполнение каналов флюсом из волокнистого материала (оксида);
- кристаллизация волокон в каналах;
- удаление волокон из вспомогательной матрицы.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанный метод обеспечивает эффективность процесса сборки матриц кристаллов корунда, который аналогичен последовательности операций для изготовления ВОП (волоконно-оптическая пластина (FiberOpticPlates)) или МКП (многоканальная пластин (Multi-ChannelPlate)). Причем, если в случаях ВОП или МКП пластины только сохраняют пространственное распределение интенсивности излучения, т.е., изображение, то здесь, благодаря люминесценцирующим свойствам кристаллов корунда, из которых изготовлены волокна, изображение не только сохраняется, но и переводится в видимую область излучения.

После получения координатно-чувствительной матрицы-преобразователя, когда на ее выходной части уже формировано изображение в видимой области, его либо прямо, либо используя необходимые оптические узлы, можно регистрировать на обычной ПЗС (Прибор с зарядовой связью) камере.

В ходе решения данной задачи были использованы некоторые операции, ко-

торые аналогичны тем операциям, которые проводятся при изготовлении и использовании ВОП. В частности, полученные изображения были переданы через волоконно-оптические пучки, что можно было осуществлять, когда расположения отдельных волокон в пучке сохранялись, и каждое волокно выдерживалось в одном и том же относительном расположении в пучке от его одного конца до другого. При этом надо учесть, что отношение площади волокон в пучке к общей площади матрицы составляет от 70% до 90%, и свет, проходящий между волокнами, должен быть блокирован. Полученные указанным образом цифровые изображения и их обработка дали возможность получения детальной количественной информации.

В целом, для сравнительных измерений интегральных интенсивностей люминесценции, были выбраны восемь разных кристаллов корунда, физические свойства которых могут наилучшим образом обеспечить условия для изготовления чувствительных преобразователей для УФ детекторов. Сравнительные измерения интегральных интенсивностей люминесценции трех предварительно выбранных кристаллов были выполнены в лабораториях RAGEA рентгеновской оптики DESY и CANDLE, причем полученные результаты сравнительных измерении хорошо коррелировались между собой.

#### 3. Выводы

Проведены исследования сцинтилляционных характеристик и оптических свойств кристаллов корунда с различными активизирующими агентами. В результате проведенных экспериментальных исследовании выбраны монокристаллы корунда с определенными легирующими примесями и оптимальными параметрами, пригодных для разработки и создания чувствительных интегральных УФ детекторов длин волн 200–400 нм с квантовым выходом  $\sim$ 0.9. Для изучения и выбора кристаллов корунда, пригодных для разработки и создания координатно-чувствительных УФ детекторов пространственным разрешением, были выявлены резонансные линии поглощения исследованных кристаллов с различными примесями, которые соответствуют конкретным легирующим элементам, определены роли легирующих примесей в формировании общего спектра поглощения, выявлены возможности принудительного формирования спектра поглощения в диапазоне интересующих длин волн (формирование квантовых точек в кристалле, имплантация нужного элемента в кристалл и т.д.), определены вклады в спектре корунда так называемых структурных центров окраски (СЦО). На основе исследованных кристаллов в качестве структурированного сцинтилляционного тонкокристаллического материала были выбраны кристаллы корунда, выращенные методом LHPG (LaserHeatedPedestalGrowth), и из изготовленных на их основе волокон-кристаллов корунда была создана матрица-связка чувствительного преобразователя для создания координатно-чувствительных УФ детекторов.

Мы благодарим наших коллег из лаборатории RAGEA, Центра Развития Естественного Излучения Света (CANDLE) и Института физической химии, а также руководство Института Прикладных Проблем Физики НАН РА, предоставивших нам возможность использовать свои экспериментальные базы для проведения данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Y. Zou, Y. Zhang, Y. Hu, H. Gu. Sensors, 18, 2072 (2018).
- 2. J. Vardanyan, M. Hovhannisyan, S. Mkhitaryan, M. Nersisyan, H. Agajanyan. Armenian Journal of Physics, 13, 382 (2020).
- 3. J. Vardanyan, G. Agajanyan, M. Nersisyan. Ibid, 12, 213 (2019).
- 4. J. Vardanyan, H. Agajanyan, M. Nersisyan. Ibid, 11, 141 (2018).
- 5. **P. Rohr**. Amorphous Silicon based matrix detectors for X-ray Imaging, Users Meeting Workshop ESRF Grenoble, France, 2003.
- Handbook of Optical Fibre Sensing Technology. Edited by Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons Inc., 824 (2002).
- 7. A. Wang. Optical Fiber Sensors and Systems. Center for Photonics Technology, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA 24061-0111, U.S.A.
- W. Zhao, J. Rowlands. Amorphous Silicon Detectors, Reference Module in Biomedical Sciences, 8, 315 (2014). DOI.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00620-1.
- Michael W. Dong, Jedrzej Wysocki. LCGC North America, 37 (10), 750 (2019). DOI:10.1016/B978-0-444-53632-7.00620-1.
- 10. H. Graafsma. J. Synchrotron Rad., 13(2), 97 (2006).
- P.E. Malinowski, J.-Y. Duboz, P. De Moor, K. Minoglou. Applied Physics Letters, 98, 141104 (2011).
- 12. X. Wang, J. Xu, Y. Zhu, KL Cooper, A. Wang. Optics Letters, 31, 885 (2006).
- 13. H. P. Garnir, P.-H. Lefebvre. Materials and Atoms, 235, 530 (2005).
- 14. E. Monroy, T. Palacios, F. Omnes, F. Calle, J.-F Hochedes. Applied Physics Letters, 80, 3198 (2002).
- 15. K. Liu, D. Shen, J. Zhang, Y. Lu, D. Jiang, et al., Proc. of SPIE, 6621 662116-1 (2008).

### INVESTIGATION AND SELECTION OF CORUNDUM CRYSTALS WITH DIFFERENT ACTIVATED AGENTS FOR DEVELOPMENT AND CREATION OF UV DETECTORS IN THE WAVELENGTH RANGE 50–400 NM

# S.A. MKHITARYAN, J.G. VARDANYAN, H.S. AGHAJANYAN, M.N. NERSISYAN, A.R. MNATSAKANYAN, H.P. HARUTYUNYAN, M.A. HOVHANNISYAN

We investigate the scintillation characteristics and optical properties of corundum crystals with various activating agents. Crystals with optimal parameters were selected which are useful for the development and creation of single-crystal integral and matrix coordinatesensitive broadband UV detectors in the range of 50–400 nm. Spectral measurements of the luminescence and absorption of corundum crystals with various dopants were carried out at several specific frequencies of irradiation and the optimal compositions and concentrations of impurities were determined. The absorption spectra of some selected samples of corundum were also studied depending on the conditions of thermal annealing. Resonant lines corresponding to each specific alloying element are identified and separated. The role of dopants in the formation of the overall absorption spectrum is studied and the possibilities of forced formation of the desired absorption spectrum in the range of wavelengths of interest are evaluated.