

Разработка алмазного фотодетектора ультрафиолетового диапазона

А. А. АЛТУХОВ¹, В. С. ФЕЩЕНКО³, В. А. ШЕПЕЛЕВ³, А. Ф. КАПЕРКО²,
В. П. КУЛАГИН²

¹ Центральный научно-исследовательский технологический институт «Техномаш»,
Москва, Россия, e-mail: UAI-Co@yandex.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, e-mail: akaperko@hse.ru

³ Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест»,
Москва, Россия, e-mail: valq2006@rambler.ru

Разработан одноэлементный ультрафиолетовый фотодетектор на основе алмаза, применяемого в спектрофотометрической аппаратуре. Представлены характеристики спектральной чувствительности детектора в зависимости от прикладываемого напряжения. Рассмотрена возможность использования подобных приборов для систем анализа состава многокомпонентных смесей.

Ключевые слова: алмаз, УФ-излучение, УФ-фотодетектор, спектрометрическая аппаратура, фоточувствительность.

Demonstrated singleton UV photodetector based on diamond, which is used in spectrophotometric equipment. This photodetector has spectral photosensitivity characteristic depending on the magnitude of the applied bias voltage. Presents the spectral characteristics of photosensitivity of the photodetector obtained experimentally. The possibility of using such photodetectors for systems analysis of the composition of multi-component mixtures and the use of photodetectors in spectrometry.

Key words: diamond, UV irradiation, UV photodetector, spectrometric equipment, photosensitivity.

Расширение спектра регистрируемого излучения в ультрафиолетовую (УФ) область, обусловленное использованием в науке, медицине, военной технике и других сферах деятельности [1—5], предопределяет интенсивное развитие фотоприёмных устройств [6—8] и спектрометрической аппаратуры [9, 10]. Совершенствование этого оборудования диктует требования к конструкционным и эксплуатационным характеристикам отдельных узлов, аппаратуры в целом и, в частности, полупроводниковых УФ-фотодетекторов. Функционирование фотоприёмных и спектрометрических приборов, анализирующих вещества в исследуемом пространстве, связано с необходимостью применения шаговых двигателей, оптико-механических и оптико-электронных узлов, таких как дифракционные решетки и многоэлементные фотоприёмники. Упростить конструкцию аппаратуры можно при использовании фотодетекторов с варьируемой спектральной чувствительностью [11, 12] и определённого математического аппарата.

Данная работа посвящена проблеме использования алмазного фотодетектора в перспективной спектрометрической аппаратуре УФ-диапазона спектра. Её актуальность связана с тем, что УФ-излучение используется при исследовании атомов, ионов, молекул и твёрдых тел для изучения их уровней энергии, вероятностей переходов и других характеристик. В УФ-области спектра лежат резонансные линии нейтральных, одно- и двухкратно ионизованных атомов, а также спектральные линии, испускаемые возбуждёнными конфигурациями высокоионизованных атомов. Многие химические соединения дают сильные полосы поглощения в УФ-области, что создает преимущества использования УФ-излучения при спектральном анализе различных материа-

лов. УФ-излучение имеет большое значение для внеатмосферной астрофизики при изучении Солнца, звёзд, туманностей и т. д. УФ-спектры Солнца и звезд несут информацию о физических процессах, происходящих в горячих областях этих космических объектов.

В то же время среди приёмников УФ-излучения, особенно коротковолнового, выгодно выделяются алмазные фотодетекторы. Их преимущества определяются уникальными свойствами природного алмаза: шириной запрещённой зоны, подвижностью носителей, малым временем жизни носителей заряда, высокими темновым сопротивлением и электрической прочностью, повышенной температурной и радиационной стойкостью алмазных кристаллов, а также минимальным уровнем собственных шумов.

В данной работе экспериментально исследованы спектральные характеристики алмазного фотодетектора и продемонстрирована зависимость их формы от смещения. На основании анализа закономерностей зависимости спектральных характеристик от смещения алмазного датчика предложена оригинальная схема спектрофотометра без диспергирующих элементов и движущихся частей, что позволяет существенно снизить время, необходимое для измерений, и повысить точность. Немаловажным практическим следствием конструкции является уменьшение массо-габаритных характеристик и повышение надёжности.

В работе также предложен математический аппарат, позволяющий решить задачу качественного и количественного анализа многокомпонентных смесей в спектрофотометрах на основе алмазного фотодетектора с управляемыми спектральными характеристиками.

Одноэлементные УФ-фотодетекторы на основе алмаза 2-а типа [6, 13] изготовлены в «Производственно-технологическом центре «УралАлмазИнвест» по собственной технологии [12]. Этот алмазный чувствительный элемент смонтирован в корпусе DIP-16 [6, 12, 13]. Его структура представлена на рис. 1. Металлические слои на верхней и нижней сторонах алмазной пластины 3 создаются последовательно по соответствующей технологии. Полупрозрачный слой платины 2 на верхней стороне в данном случае является первым электродом и пропускает излучение УФ-детектора. Алюминиевый контакт 1 служит промежуточным звеном для точечной сварки проволоки на участке от площадки корпуса до фотодетектора. Алюминиевый слой 4 на нижней стороне пластины является вторым электродом. В фотодетекторах на основе пластин полупроводникового алмаза максимум проводимости соответствует длинам волн 220—225 нм вблизи края фундаментального поглощения. Токовая чувствительность в данных приборах может достигать 0,1 А/Вт на длине волны около 220 нм [6, 12, 13]. В коротковолновой области наблюдается резкий спад фотопроводимости, связанный с уменьшением проникновения УФ-излучения вглубь алмаза из-за нарастающего поглощения. Следовательно, между верхним и нижним электродами увеличивается объем алмаза, в котором генерация свободных носителей заряда не происходит, что приводит к резкому уменьшению фототока вследствие снижения количества достигших нижнего электрода носителей заряда при их рекомбинации. В то же время с ростом напряжения смещения число зарядов, достигающих нижнего электрода, увеличивается и, следовательно, возрастает фототок, влияющий на форму характеристики спектральной чувствительности [11]. Для подтверждения этой гипотезы авторы провели серию экспериментов.

Экспериментальные результаты. С помощью осветительного устройства, имеющего лампу ДДС-30, на входную щель монохроматора МДР-23 направляли УФ-излучение. Монохроматор из всего спектра излучения выделял монохроматическую составляющую, которая подавалась на алмазный фотодетектор. Фотосигнал регистрировали устройством при одном и том же напряжении смещения, которое, как и напряжение питания, подавали с блока питания. Спектр УФ-излучения колебался в пределах 190—280 нм. Затем напряжение смещения меняли и снова измеряли спектральную характеристику.

Спектральную чувствительность УФ-фотодетектора определяли на основе алмаза 2-а типа при напряжениях смещения между электродами 0—150 В с шагом 10 В, переходя от одной длины волны излучения к другой. Данные измерений представлены на рис. 2, из которого следует, что формы характеристик зависят от напряжения смещения [4, 5]. Иными словами, фототок при различных длинах волн падающего излучения изменяется по-разному при смене напряжения смещения. Зависимости отклоняются вблизи длины волны излучения 225 нм, что связано с существованием около этой границы максимума фундаментального поглощения алмаза. Характер фотопроводимости, обусловленной поглощением излучения с длинами волн менее или более 225 нм, связан с расположением мест генерации электронно-дырочных пар, т. е. тонкого поверхностного или объемного слоев алмазной пластины [11, 12].

Использование алмазных фотодетекторов в спектрометрии. Удобство и простота управления распределением спектральной чувствительности алмазных фотодетекторов

через варьирование напряжения смещения открывает пути для создания систем распознавания состава многокомпонентных смесей.

Рассмотрим задачу распознавания в общем виде. Пусть исследуемая среда состоит из одного компонента. Тогда согласно закону Бугера-Ламберта-Бера поглощение излучения будет определяться выражением [1]:

$$I/I_0 = \exp [-KcI],$$

где I , I_0 — прошедший и падающий потоки излучения, соответственно; K — молярный коэффициент поглощения исследуемого вещества; c — концентрация в данном растворе; l — толщина слоя вещества, через которое проходит свет.

Если среду освещать источником УФ-излучения мощностью 1 Вт во всем исследуемом диапазоне, то прошедшее излучение будет иметь интенсивность $I = \exp [-Kd]$, где $d = cl$. Следовательно, фототок J , зарегистрированный на фотоприемнике, при потоке УФ-излучения, прошедшего через среду, запишем как

$$J = S \exp [-Kd],$$

где S — спектральная чувствительность фотоприемника.

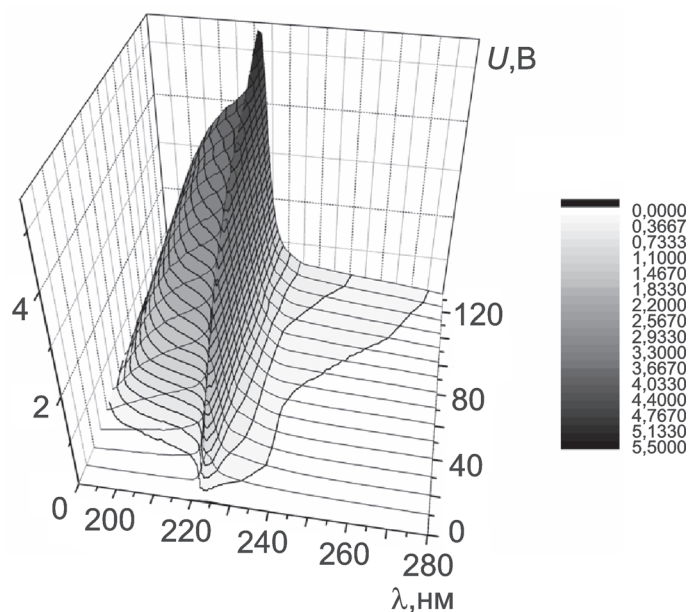


Рис. 2. Характеристики спектральной чувствительности алмазного УФ-фотодетектора, полученные при подаче различных напряжений смещения

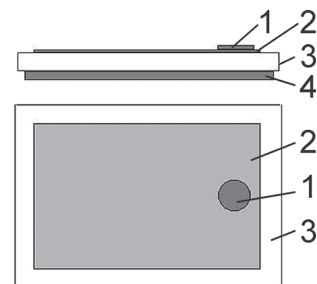


Рис. 1. Схематическое изображение слоев металлов на алмазной пластине одноэлементного УФ-фотодетектора:

1 — алюминиевый контакт; 2 — полупрозрачный слой платины; 3 — алмазная пластина; 4 — алюминиевый слой на нижней стороне пластины

Если среда состоит из n компонентов, то

$$J = S \exp \left[- \sum_{i=1}^{i=n} K_i d_i \right], \quad (1)$$

где K_i — молярный коэффициент поглощения i -й компоненты; d_i — параметр, зависящий от концентрации i -й компоненты.

Из (1) следует, что при измерении фототока нельзя однозначно определить, какие вещества находятся в смеси. Изменив смещение фотодетектора, можно варьировать форму спектральной чувствительности фотоприёмника и фактически менять аппаратную функцию системы. Зависимость фототока от падающего излучения будет выглядеть как

$$J_j = S_j \exp \left[- \sum_{i=1}^{i=n} K_{ij} d_{ij} \right],$$

где S_j — спектральная чувствительность фотоприёмника при j -м напряжении смещения; K_{ij} — молярный коэффициент поглощения i -й компоненты в j -м интервале спектра; d_{ij} — параметр, зависящий от концентрации i -й компоненты в j -м интервале спектра.

Преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\sum_{i=1}^{i=n} K_{ij} d_{ij} = - \ln [J_j / S_j]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что если $n=j$, то можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} K_{11}d_{11} + K_{21}d_{21} + K_{31}d_{31} + \dots + K_{n1}d_{n1} = - \ln [J_1 / S_1]; \\ K_{12}d_{12} + K_{22}d_{22} + K_{32}d_{32} + \dots + K_{n2}d_{n2} = - \ln [J_2 / S_2]; \\ K_{13}d_{13} + K_{23}d_{23} + K_{33}d_{33} + \dots + K_{n3}d_{n3} = - \ln [J_3 / S_3]; \\ \vdots \\ K_{1j}d_{1j} + K_{2j}d_{2j} + K_{3j}d_{3j} + \dots + K_{nj}d_{nj} = - \ln [J_j / S_j]. \end{cases}$$

Так как K_{ij} известна для каждого искомого вещества, а S_j — для алмазного фотодетектора, то, измерив фототок при j разных напряжениях смещения, можно определить состав многокомпонентной смеси, допустив, что при равенстве нулю всех d_i данные компоненты в растворе отсутствуют.

Заключение. Представлены результаты экспериментального определения спектральных характеристик одноэлементного УФ-детектора на основе алмаза 2-а типа. Результаты получены при различных напряжениях смещения, подаваемых на электроды фотодетектора. Отмечено, что форма спектральной чувствительности существенно зависит от напряжения смещения. Рассмотрена возможность построения на основе алмазного детектора УФ-диапазона спектральных приборов для анализа состава многокомпонентных смесей, для чего использовано варьирование спектральной чувствительности при различных напряжениях смещения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение №14.579.21.0047, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57914X0047).

Литература

1. **Clark B., Frost T., Russell M. A.** UV Spectroscopy: Techniques, instrumentation and data handling. London, N. Y.: Chapman & Hall: Springer, 1993.
2. **Gorka B. J., Nilsson B., Svensson R.** Design and characterization of a tissue-equivalent CVD-diamond detector for clinical dosimetry in high-energy photon beams // *Physica Medica*. 2008. N. 24. P. 159—168.
3. **Coffey V. C.** Military program develops novel UV sources // *Laser Focus World*. 2009. V. 45. N. 7. P. 143—145.
4. **Gorokhov E. V., Magunov A. N., Feshchenko V. S., Altukhov A. A.** Solar-Blind UV Flame Detector Based on Natural Diamond // *Instr. Exp. Tech.* 2008. N. 51. P. 280—283.
5. **Paul N. D., Gwynn-Jones D.** Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach // *Trends Ecol. Evol.* 2003. V. 18. N. 1. P. 48—55.
6. **Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Горохов Е. В.** Алмазные фотоприёмники ультрафиолетового диапазона // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2007. № 4. С. 29—31.
7. **Шепелев В. А., Алтухов А. А., Фещенко В. С.** Исследование процессов в алмазных датчиках УФ излучения на основе спектрально-вольт-амперных характеристик // *Молодёжь в науке: Сб. докладов X науч.-техн. конф. Саров*, 2011. С. 503—506.
8. **Шепелев В. А., Алтухов А. А., Буробин В. А.** Одноэлементные и многоэлементные детекторы УФ излучения на основе широкозонных (алмаз и карбид кремния) материалов // *Труды XXIII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения*. М. 2013. С. 237—240.
9. **Асадов Х. Г., Раджабли Р. Т.** Сравнительный метод калибровки солнечных фотометров в ультрафиолетовом диапазоне // *Измерительная техника*. 2013. № 3. С. 20—21.
10. **Аневский С. И., Золотаревский Ю. М., Иванов В. С., Крутиков В. Н., Минаева О. А., Минаев Р. В., Титов А. Ю., Сенин Д. С.** Оптимизация параметров эталонного источника синхротронного излучения с сильным магнитным полем для калибровки ультрафиолетовых плазменных излучателей и интегральных радиометров-дозиметров // *Измерительная техника*. 2012. № 12. С. 17—22.
11. **Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Шепелев В. А.** Спектры фоточувствительности структур на основе природного алмаза // *Aktualnivymozhenostivedy-2011: Materialy VII mezinarodni vedecko-prakt. conf. Praha: Educationand Science*, 2011. P. 57—65.
12. **Mityagin A. Yu., Feshchenko V. S.** UV photodetectors based on natural diamond. Odessa: Politehperiodika, 2013.
13. **Алтухов А. А., Ключкова А. Ю., Митягин А. Ю., Орлова Г. А., Поляков В. И., Талипов Н. Х., Фещенко В. С.** Ультрафиолетовые фотоприёмники на основе природных алмазов // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52. № 3. С. 381—384.

Дата принятия 27.04.2015 г.