

УДК 681.785.574

А. Ю. Б о й к о, И. Г. С. Г о л я к, И. Л. С. Г о л я к,
С. К. Д в о р у к, А. М. Д о р о в с к и х,
А. А. Е с а к о в, В. Н. К о р н и е н к о,
Д. В. К о с е н к о, И. В. К о ч и к о в,
А. Н. М о р о з о в, С. И. С в е т л и ч н ы й,
С. Е. Т а б а л и н

СТАТИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО УЛЬТРА- ФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

Приведено описание созданного статического фурье-спектрометра на основе светоделительного куба для регистрации спектров в диапазоне длин волн 300...700 нм. Использование прибора с зарядовой связью как детектора позволяет заметно повысить отношение сигнал/шум и уменьшить время, необходимое для регистрации спектров. Описана методика получения и обработки спектров излучения. Представлены результаты экспериментов по регистрации спектров люминесценции и лазерного излучения. Для сравнения использованы спектры, зарегистрированные на дифракционном спектрометре.

Ключевые слова: спектр, статический фурье-спектрометр, интерференция, интерферограмма, люминесценция, лазерное излучение, выигрыш Фелжета.

В настоящее время одной из актуальных задач развития современного спектрального анализа является разработка новых спектральных приборов, обладающих лучшими характеристиками, или улучшение уже существующих систем за счет использования современных технологий. Условно спектроанализирующие комплексы можно разделить на две большие группы: классические спектральные приборы, осуществляющие кодировку пространства длинами волн (интерферометры Фабри–Перо, дифракционные спектрометры и др.) и новые, кодирующие длинами волн электрические частоты (фурье-спектрометры и адамар-спектрометры) [1]. Среди спектральных приборов, принадлежащих ко второй группе, в составе спектроскопических методов молекулярного анализа вещества наиболее успешно развиваются фурье-спектрометры, обладающие рядом преимуществ [1] — большей светосилой по сравнению с дифракционными решетками (выигрыш Жакино); одновременностью регистрации всех спектральных интервалов; большим диапазоном реализуемых спектральных разрешений, определяемых разностью хода в плечах интерферометра; большой шириной одновременно регистрируемого спектра.

В свою очередь, развитие фурье-спектрометров идет по двум направлениям, одно из которых представлено динамическими фурье-спектрометрами. Основой таких систем является интерферометр Майкельсона, в котором за счет изменения положения одного из зеркал, изменяется оптическая разность хода лучей и происходит развертка интерферограммы во времени и при этом сигнал регистрируется одноэлементным фотодетектором [2]. Другое направление связано с появлением многоэлементных фотоприемных устройств, благодаря которым стали возможны конструкции статических фурье-спектрометров, т.е. спектрометров без использования подвижных элементов. В таких системах изменение разности хода осуществляется в пространстве в отличие от динамических фурье-спектрометров, в которых развертка сигнала происходит во времени. Отсутствие подвижных элементов позволило значительно уменьшить габариты спектрометра, увеличить стойкость к вибрационным и тепловым (температурным) воздействиям. Многоэлементное фотоприемное устройство, используемое для считывания сигнала, позволяет добиться выигрыша в быстродействии и точности измерений в \sqrt{M} раз, поскольку каждый участок спектра измеряется не один, а M раз (выигрыш Фелжета) [3].

Для одной из возможных систем построения статического фурье-спектрометра могут использоваться двупреломляющие кристаллы (поляризационные интерферометры, реализованные на основе призм Волластона или пластин Саварта) [4–12]. Эти системы обладают всеми качествами, относящимися к стандартным динамическим фурье-спектрометрам — высокой светосилой, нечувствительностью к рассеянному свету, высоким быстродействием. К недостаткам таких спектрометров можно отнести малый телесный угол падающего излучения и ограничение по разрешающей способности [7].

Спектральное разрешение $\delta\lambda$ статического фурье-спектрометра определяется выражением

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2(n_o - n_e)D}, \quad (1)$$

где D — размер основания призмы Волластона, n_o , n_e — коэффициенты преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей. Параметры подобного спектрометра существенно зависят от оптических констант двулучепреломляющего кристалла и его физических размеров. Если в качестве материала использовать кристаллы кварца, для которых $(n_o - n_e) \approx 0,01$, то физический размер призмы (см. (1)) существенно скажется на спектральном разрешении $\delta\lambda$ [3]. Так, для $\lambda = 300$ нм имеем $\delta\lambda = 4,5 \cdot 10^6 / D$ нм. В расчетах [7] для спектрометра на основе призм Волластона допустимый угол наклона лучей к

оси не превышал $\pm 1,8^\circ$, а телесный угол входного отверстия составлял 0,004 ср. Расчетные значения параметров разрешающей способности R_0 и предела разрешения $\delta\lambda$ составляют 234 и 1,71 нм на длине волны 400 нм. В таких спектрометрах реализуется одномерная интерференционная картина, которая и регистрируется ПЗС-линейкой. Ее использование не позволяет отслеживать дефекты, связанные с наклоном интерференционных полос, вследствие чего может происходить размытие получаемой интерференционной картины.

Возможным вариантом для построения статического фурье-спектрометра может служить конструкция в виде цельноблочного интерферометра [13, 14], состоящая из комбинации нескольких оптических элементов — трипель призмы и пентапризмы. Такие спектрометры работают в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Эти системы обладают хорошей устойчивостью к вибрациям, ударным нагрузкам, оптическим и механическим смещениям и температурным перепадам. Их характерной особенностью является малый телесный угол входящего пучка лучей.

Авторам работы [14] удалось снизить ограничения на входящий пучок лучей за счет уменьшения числа оптических элементов, что позволило получить почти монолитную конструкцию. В соответствии с приведенными расчетами для такого спектрометра угловое поле зрения может быть рассчитано по формуле

$$\theta = 2\text{tg}^{-1} \frac{w}{8a} \cong 8^\circ, \quad (2)$$

где w — размер апертуры; a — оптическое плечо интерферометра.

Для спектрометра, рассматриваемого в настоящей статье, предельный угол входящего луча составил $\sim 10^\circ$, что оказалось больше расчетного значения (см. (2)). Возможно построение статического фурье-спектрометра на основе интерферометра с обратным круговым ходом лучей — интерферометра Саньяка [15, 16]. Для таких интерферометров ограничение по углам падающих лучей отсутствует, но их гигантскую светосилу трудно реализовать практически из-за возникающего виньетирования наклонных пучков [3].

Фурье-спектрометр на основе явления интерференции в клине рассмотрен в работе [17]. Такие спектрометры могут быть весьма компактными, не требующими периодической юстировки, при этом они обладают хорошим спектральным разрешением и светосилой. Оптический диапазон и условия эксплуатации во многом зависят от выбора материала для их изготовления. В основе таких систем лежит светоделительный куб, представляющий собой склейку двух прямоугольных призм по гипотенузным граням. Одна из призм изготавливается с наклоненной под небольшим углом гранью, за счет чего возникает

различие между оптически-ми путями преломленного и отраженного лучей. Спектрометр на основе такого светоделительного куба разработан фирмой Astrium GmbH [18]. Рабочий спектральный диапазон составляет 450...2350 нм при спектральном разрешении в видимом диапазоне 2,5...10 нм и 5...30 нм в ближней ИК области.

Построение статического фурье-спектрометра. В оптической системе, приведенной на рис. 1, интерферометр выполнен в виде светоделительного куба с двумя отражающими гранями, наклоненными под углом к основанию куба. Светоделительный куб представляет собой гипотенузную

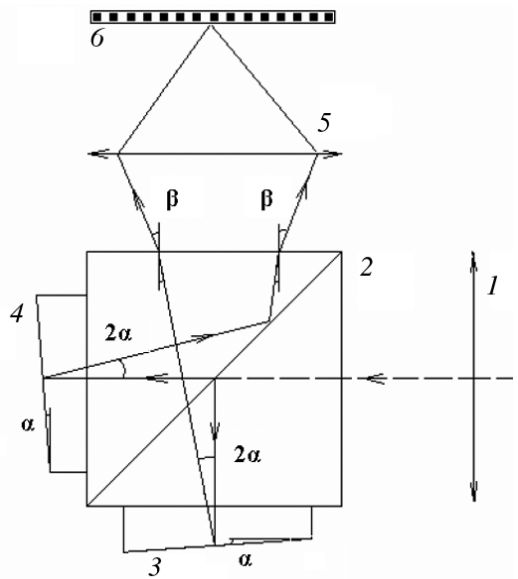


Рис. 1. Ход лучей в схеме со светоделительным кубом, с двумя наклоненными зеркальными гранями:

1 — входной объектив; 2 — светоделитель; 3, 4 — наклоненные зеркальные грани светоделительного куба; 5 — проекционный объектив; 6 — ПЗС-камера

склейку двух призм, к которым приклеиваются отражающие грани в виде клиньев. Луч света, сформированный входным объективом 1, попадает на светоделитель 2, где (в идеале) делится на два пучка одинаковой интенсивности — преломленный и прошедший. Поглощение излучения в светоделителе приводит к искажению регистрируемого спектра и потере чувствительности. Неравенство коэффициентов отражения и пропускания уменьшает контрастность интерференционной картины. Преломленный светоделителем 2 луч отражается от зеркальной грани 3 и снова проходит через светоделитель 2, выходя под углом β к верхней грани куба. Прошедший луч отражается от грани 4, преломляется светоделителем 2 и выходит под углом $-\beta$. В такой оптической системе мнимое изображение интерференционной картины располагается на гранях куба 3, 4. При помощи проекционного объектива 5 изображение строится в плоскости фотоприемного устройства, где происходит интерференция лучей. В качестве фотоприемного устройства 6 использована ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью) размером 795×596 пиксел ($7,4 \times 5,95$ мм) камеры WAT 902 H2 Ultimate (Watec®).

Для изготовления оптических элементов спектрометра использовано кварцевое стекло. Выбор данного материала обусловлен спектраль-

ным диапазоном люминесценции исследуемых веществ и спектральной чувствительностью ПЗС-матрицы.

Углы наклона α отражающих граней 3 и 4 рассчитаны по формуле

$$\alpha = \lambda/8nl = 0,143^\circ, \quad (3)$$

где n — показатель преломления для кварца, равный 1,47 при длине волны $\lambda = 300$ нм; l — размер фоточувствительного элемента. При этом учтены как критерий получения максимального спектрального разрешения, так и условие теоремы Котельникова о том, что для восстановления сигнала необходимо частоту дискретизации сигнала выбирать в два раза больше частоты основного сигнала.

Спектральное разрешение $\delta\lambda$ рассчитывается по формулам [19]

$$\delta\nu = \frac{1}{\beta L} = 114,5 \text{ см}^{-1}; \quad (4)$$

$$\delta\lambda = -\delta\nu\lambda^2 = 1,04 \text{ нм} \quad (\lambda = 300 \text{ нм}), \quad (5)$$

где L — максимальная оптическая разность хода; β — угол преломления луча на выходе из интерференционного куба, который связан с углом α соотношением

$$\alpha = \beta/2n. \quad (6)$$

Разрешающая способность R_0 фурье-спектрометра тем выше, чем больше число регистрируемых интерференционных полос. Ее можно получить по формуле

$$R_0 = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{300}{1,04} = 288. \quad (7)$$

Для предельного угла веера пучков φ справедливо соотношение

$$\varphi \leq 2\sqrt{\frac{2}{R_0}} = 9,52^\circ. \quad (8)$$

В качестве источника излучения использовали вторичное излучение (люминесценцию) образцов, собственное излучение светодиода или лазера. Для преобразования аналогового сигнала с камеры использовано устройство видеозахвата. При помощи специально разработанного программного обеспечения проводились обработка полученных интерферограмм и последующее преобразование интерферограммы в спектр. Сигнал, идущий на спектрометр, перемешивался с помощью оптоволоконна, что позволило исключить наблюдение изображения области регистрации.

Алгоритм получения спектров. Для визуализации изображений, выбора угла наклона интерференционных полос, масштаба, области обработки, а также преобразования интерферограммы в спектр разработано специализированное программное обеспечение.

Полученная на статическом фурье-спектрометре интерферограмма представляет собой матрицу значений интенсивности размера $N_1 \times N_2$:

$$f_{jk} = \begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & \cdots & f_{0,N_1-1} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & \cdots & f_{1,N_1-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{N_2-1,0} & f_{N_2-1,1} & \cdots & f_{N_2-1,N_1-1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где f_{jk} — исходный сигнал; N_1, N_2 — число фоточувствительных элементов в столбце и строке.

Для исключения снижения яркости на краях изображения, связанного с неоднородностью засветки интерференционной картины, в программе изменение сигнала аппроксимируется плавной линией. Вычитанием из первоначального сигнала плавно изменяющейся составляющей выравнивается фон, что является первым этапом обработки.

Поскольку шум двумерного изображения довольно высок, проводится усреднение интенсивности интерференционных картин по сечениям, перпендикулярным интерференционным линиям. Для каждого изображения определены 11 сечений, разнесенных по вертикали, и подобран такой угол, что изображения в разных сечениях максимально близки друг к другу. Результирующая одномерная картина интенсивностей (автокоррелограмма) получается усреднением всех сечений. Поскольку каждое сечение строится усреднением по некоторой узкой полосе, фактически в результирующей кривой проведено усреднение по большей части полезной площади изображения.

Для получения спектров излучения веществ выполняется дискретное преобразование Фурье по результирующей интерферограмме:

$$f'_m = \sum_{k=0}^{N_1-1} f_k e^{-2\pi i k m / N_1}, \quad (10)$$

где f'_m — спектр сигнала; f_k — результирующая интерферограмма; m — частотная переменная; k — пространственная переменная; i — мнимая единица.

Результатом обработки является распределение $|I'_m|^2 = (\text{Re} f'_m)^2 + (\text{Im} f'_m)^2$ по частотам m . Для удобства полученные спектры пересчитываются в длины волн λ . Замена дискретного преобразования Фурье на быстрое преобразование Фурье позволяет значительно уменьшить время, необходимое для регистрации спектров излучения веществ, и увеличить точность за счет уменьшения числа операций, что является значимым при экспресс-анализе веществ.

Для всех спектров, полученных на статическом фурье-спектрометре, шаг между отсчетами для восстановления интерферограмм вы-

бирали из условия максимальной корреляции со спектрами полученными на стандартном спектрометре. При неправильном выборе шага спектр может отличаться от спектра, полученного на стандартном спектрометре, и оказаться смещенным в высокочастотную или в низкочастотную область, что влияет на распознавание вещества.

Анализ полученных результатов. В результате проведенных экспериментов регистрировались интерферограммы излучения ультрафиолетового светодиода с длиной волны 365 нм и мощностью 30 мВт; лазера с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт; люминесценции различных веществ при возбуждении ультрафиолетовыми источниками света с длинами волны 365 и 266 нм и мощностями 30 мВт и 6 мВт соответственно.

Обработка полученных интерференционных картин затруднена в связи с геометрическими искажениями, а также нелинейным преобразованием интенсивностей при регистрации интерферограммы.

Влияние неточностей изготовления интерференционного куба становится заметно при получении интерферограмм излучения когерентных источников. Для учета этого эффекта при обработке интерферограммы сначала необходимо получить интерферограмму монохроматического источника с известной длиной волны, которая при обработке может служить в качестве маски. Излучение монохроматического источника можно использовать при тарировке (определении расстояния между фоточувствительными элементами с учетом коэффициента увеличения).

В результате экспериментов по определению оптимального числа пикселей на период интерферограммы было установлено, что оптимальное число пиксел, приходящихся на ширину интерференционной полосы для качественного восстановления сигнала, должно быть не меньше четырех. При увеличении числа пиксел на ширину интерференционной полосы сильно снижается спектральное разрешение системы, при этом нет заметного улучшения качества получаемых интерференционных картин. Уменьшение числа пиксел, приходящихся на один период интерферограммы, сильно сказывается на качестве изображения из-за ошибок интерполяции восстанавливаемых интерферограмм, что ведет к зашумленности получаемого спектра.

Полученная интерферограмма лазерного излучения с длиной волны 532 нм (рис. 2) содержит множество мелких и крупных неоднородностей (пятна, разрывы линий и т.п.). Причем интенсивность интерференционной картины практически не убывает во всем поле зрения прибора. На краях картины происходит нелинейное искажение интерференционных полос, что связано с аберрациями проецирующего

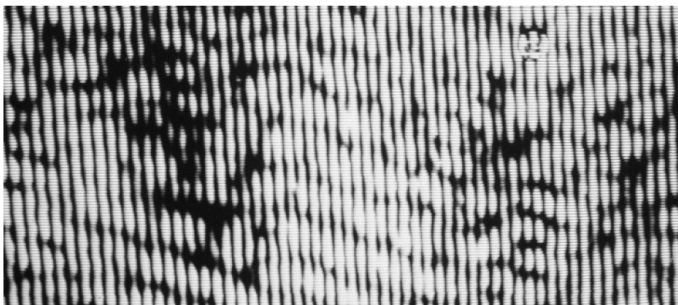


Рис. 2. Фрагмент интерференционной картины для лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм

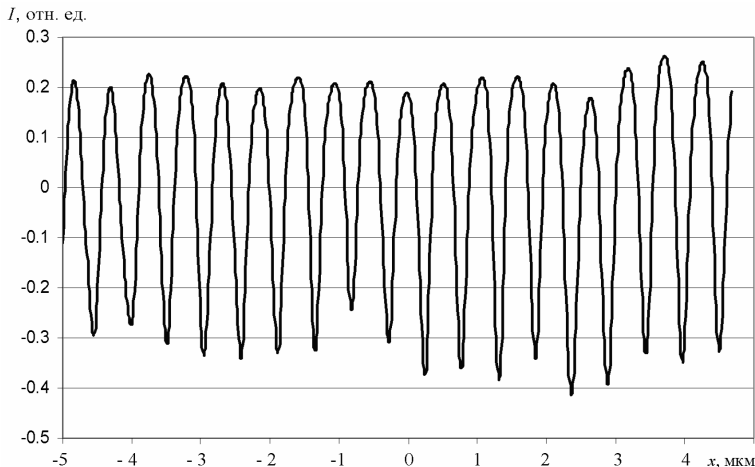


Рис. 3. Фрагмент усредненной интерферограммы для лазерного излучения

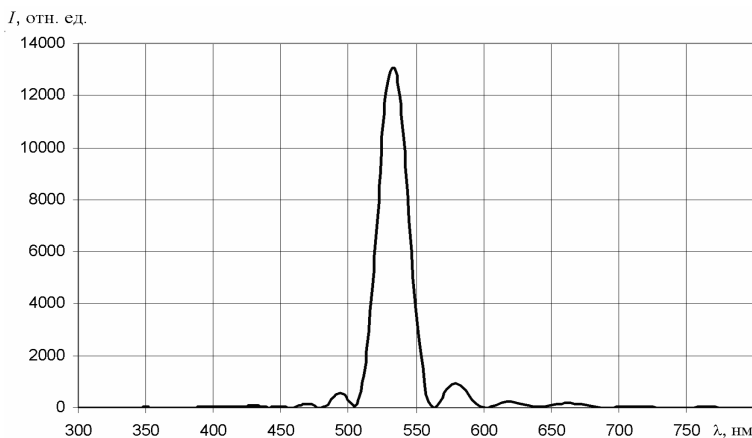


Рис. 4. Восстановленный спектр лазерного излучения (расстояние между отсчетами интерферограммы принято равным 11,1 нм)

объектива. На рис. 3 и 4 показаны фрагмент усредненной интерферограммы для лазерного излучения (по оси ординат отложена интенсивность I в относительных единицах, а по оси абсцисс разность хода x ,



Рис. 5. Фрагмент интерференционной картины вторичного излучения антрацена при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм)

мкм) и полученный спектр лазерного излучения соответственно (по оси ординат отложена интенсивность I в относительных единицах, а по оси абсцисс — длина волны λ , нм).

В качестве эталонных веществ использованы антрацен ($C_{14}H_{10}$), РОРОР ($C_{24}H_{16}N_2O_2$), стильбен ($C_{14}H_{12}$).

На рис. 5 приведен фрагмент центральной части интерференционной картины люминесценции антрацена при возбуждении излучением светодиода с длиной волны $\lambda = 365$ нм. При рассмотрении изображения становятся заметны темные пятна (падение интенсивности), связанные с дефектами светоделительного куба. Они могут сильно сказаться на результирующей интерферограмме, что приведет к ее несимметричности и последующему искажению спектра.

На рис. 6 показан фрагмент интерферограммы, полученной по центральной части интерференционной картины. Заметна несимметричность правой и левой частей интерферограммы. При приближении к краям наблюдается падение интенсивности, связанное с неравномерностью засветки.

Для примера на рис. 7 показана некачественная интерферограмма, полученная по небольшой полосе, вырезанной из нижней части интерференционной картины. Наблюдается полное отсутствие симметричности и сильное искажение при $x = -10$ мкм, которое связано с наличием дефекта в данной области.

Перепады интенсивностей связаны с особенностями системы регистрации изображения. Для устранения падения яркости по краям интерференционных картин ее значения программно аппроксимируются плавной кривой, что позволяет получить “очищенную” интерферограмму. Использование многоэлементного фотоприемного устройства как детектора дает возможность проводить усреднение по полю изображения, что позволяет заметно повысить отношение сигнал/шум, в результате чего удастся выровнять фон (убрать постоянную составляющую сигнала) и частично избавиться от искажения изображения.

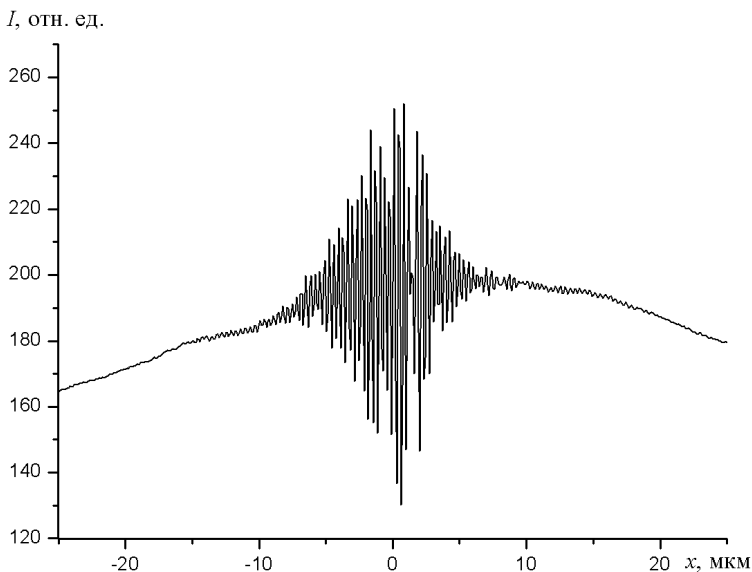


Рис. 6. Фрагмент интерферограммы вторичного излучения антрацена ($\lambda = 365$ нм), взятый по всей интерференционной картине

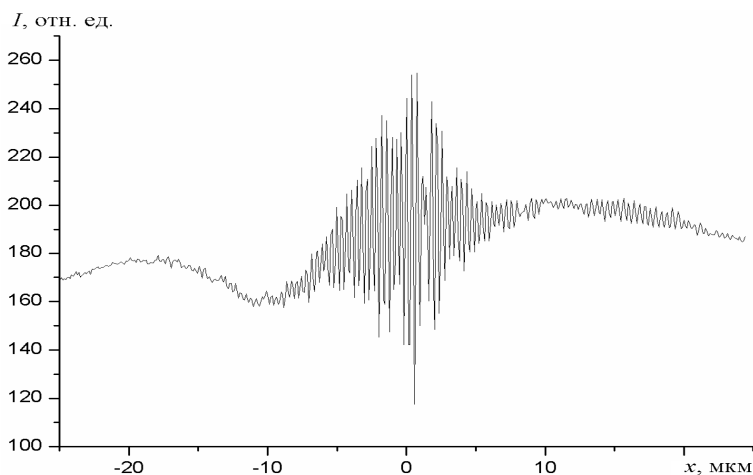


Рис. 7. Фрагмент интерферограммы вторичного излучения антрацена ($\lambda = 365$ нм), взятый по нижнему сечению

На рис. 8 показана усредненная интерферограмма, полученная из интерферограммы, изображенной на рис. 6, с вычетом фона. Искажения почти незаметны, форма интерферограммы приобрела симметричный вид.

Спектры люминесценции антрацена, полученные на статическом фурье-спектрометре при возбуждении излучением светодиода с длиной волны $\lambda = 365$ нм и лазера с длиной волны $\lambda = 266$ нм (рис. 9, б, 10, б), похожи на спектры, полученные от тех же источников возбуждающего излучения на стандартном спектрометре (рис. 9, а, 10, а).

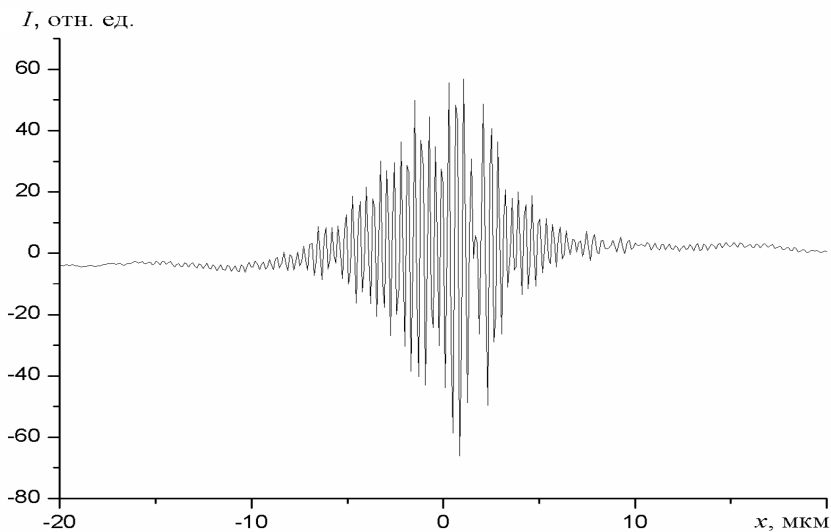


Рис. 8. Фрагмент интерферограммы вторичного излучения антрацена ($\lambda = 365$ нм), использованной для восстановления спектра

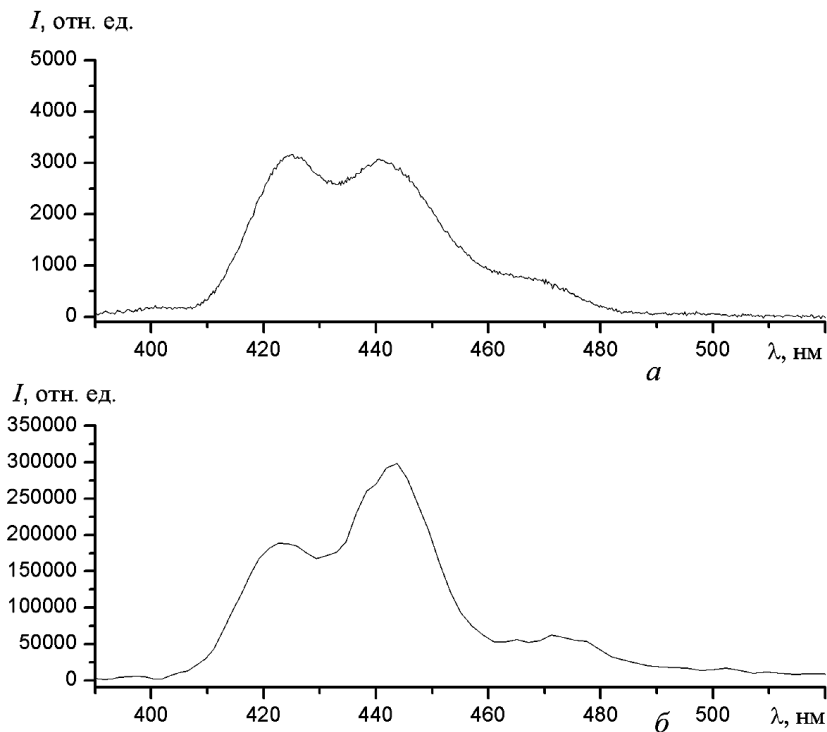


Рис. 9. Спектры вторичного излучения антрацена при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм), полученные с использованием спектрометра с дифракционной решеткой (а) и на статическом фурье-спектрометре (б)

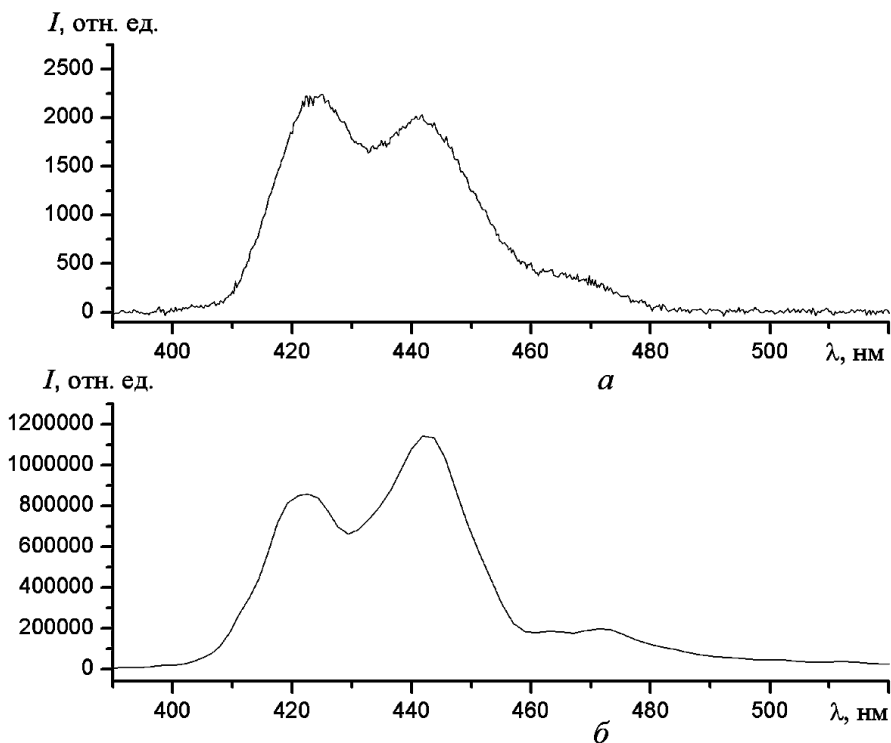


Рис. 10. Спектры вторичного излучения антрацена при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм), полученные с использованием спектрометра с дифракционной решеткой (*а*) и на статическом фурье-спектрометре (*б*)

Стандартным спектрометром служил дифракционный спектрометр на основе сферической отражающей решетки с 600 штрихами на миллиметр, оптимизированной для длин волн 200... 850 нм. Спектр снимался с помощью фотоприемной линейки с общим числом элементов 3648 и размером $0,008 \times 0,2$ мм. Чувствительность самого спектрометра составляла 0,1... 0,2 нВт.

На всех спектрах присутствуют два ярко выраженных пика в области длин волн $\lambda = 420$ нм и $\lambda = 441$ нм. Спектры на рис. 9, *б* и 10, *б* более растянуты по сравнению со спектрами, полученными на дифракционном спектрометре, и наблюдаются расхождения в положении максимумов.

На рис. 11 и 12 приведены спектры люминесценции РОРОР, полученные при возбуждении образцов излучением светодиода с длиной волны $\lambda = 365$ нм (рис. 11, *б*) и лазером с длиной волны $\lambda = 266$ нм (рис. 12, *б*). Для сравнения на рис. 11, *а* и 12, *а* приведены те же спектры, но полученные на дифракционном спектрометре. Как видно, в спектрах имеется характерный для РОРОР пик на длине волны $\lambda = 465$ нм.

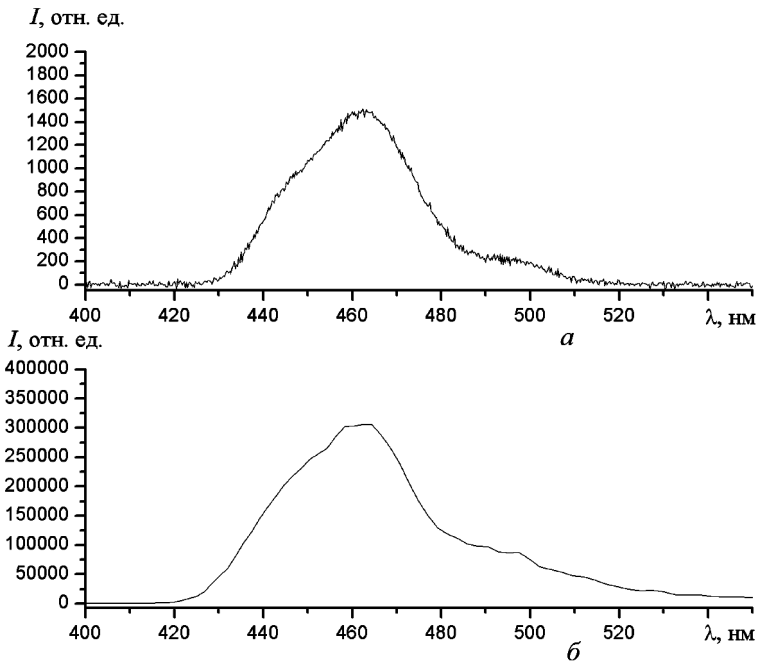


Рис. 11. Спектры вторичного излучения РОРОР при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм), полученные с использованием спектрометра с дифракционной решеткой (а) и на статическом фурье-спектрометре (б)

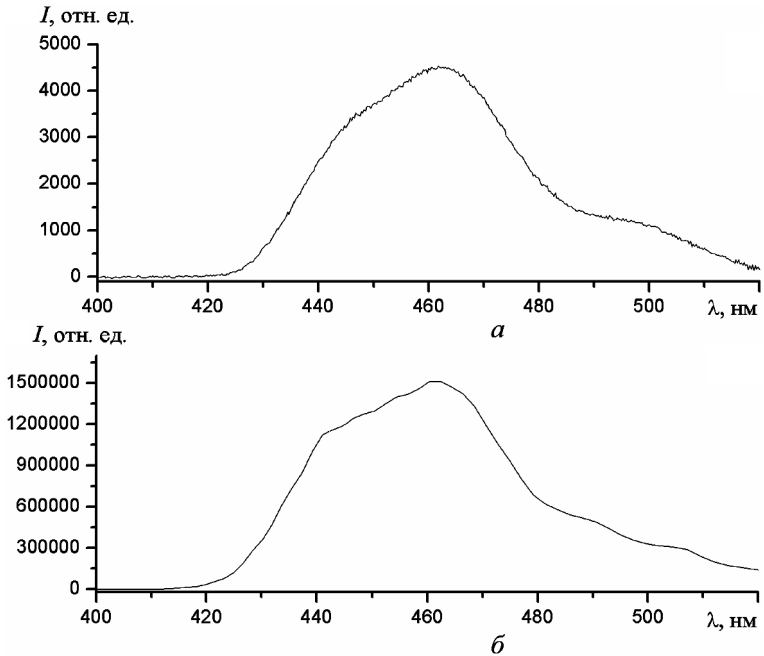


Рис. 12. Спектры вторичного излучения РОРОР при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм), полученные с использованием спектрометра с дифракционной решеткой (а) и на статическом фурье-спектрометре (б)

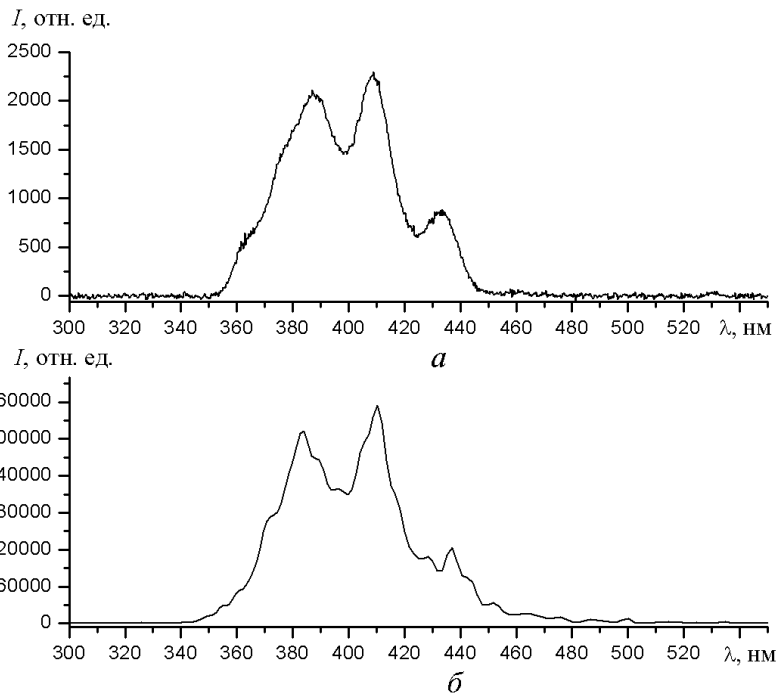


Рис. 13. Спектры вторичного излучения стильбена при возбуждении излучением светодиода ($\lambda = 365$ нм), полученные с использованием спектрометра с дифракционной решеткой (*а*) и на статическом фурье-спектрометре (*б*)

На рис. 13 приведены спектры люминесценции стильбена при возбуждении лазером с длиной волны $\lambda = 266$ нм. На рис. 13, *а* приведен спектр, полученный на дифракционном спектрометре, а на рис. 13, *б* — полученный на статическом фурье-спектрометре. На обоих спектрах присутствуют три характерных пика. Заметно несовпадение максимумов по длинам волн. Как и в спектрах других веществ, наблюдается зашумленность спектра, полученного при использовании спектрометра на основе дифракционной решетки (см. рис. 13, *а*).

Все спектры, полученные на дифракционном спектрометре, зашумлены, в то время как спектры, полученные на статическом фурье-спектрометре, выглядят более гладко. Результаты сравнения отношения сигнал/шум для обоих спектрометров приведены в табл. 1. Сильнее всего зашумлен спектр люминесценции РОРОР при возбуждении светодиодом с длиной волны $\lambda = 365$ нм (рис. 11, *а*). Для него отношение сигнал/шум самое низкое, в отличие от спектра (см. рис. 11, *б*) того же вещества, полученного на статическом фурье-спектрометре, для которого отношение сигнал/шум больше почти в 16 раз.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции спектров излучения для одинаковых веществ, полученных на разных спектрометрах. Максимальное значение получено для стильбена при возбуждении светодиодом с длиной волны 365 нм. Хуже всего коррелируют

спектры люминесценции РОРОР при источнике возбуждения с длиной волны 266 нм.

Таблица 1

Отношение сигнал/шум для спектров, полученных на дифракционном спектрометре и статическом фурье-спектрометре

Вещество	Источник излучения	Отношение сигнал/шум	
		дифракционный спектрометр	статический фурье-спектрометр
Антрацен	светодиод	150	490
	лазер	120	960
РОРОР	светодиод	100	1590
	лазер	330	730
Стильбен	лазер	220	1590

Таблица 2

Коэффициенты корреляции спектров, полученных на дифракционном спектрометре и статическом фурье-спектрометре

Вещество	Источник излучения	Коэффициент корреляции
Антрацен	светодиод	0,79
	лазер	0,83
РОРОР	светодиод	0,82
	лазер	0,76
Стильбен	лазер	0,88

Выводы. Из результатов исследований следует, что качество получаемых интерферограмм достаточно для построения и обработки спектров излучения веществ, имеющих вторичное излучение в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах.

Использование спектрометра на основе разработанной статической интерференционной системы позволяет добиться выигрыша в светосиле по сравнению со стандартным спектрометром на основе дифракционной решетки.

Использование ПЗС-матрицы как регистрирующего элемента вместо ПЗС-линейки позволяет при обработке изображений заметно увеличить (как минимум на порядок) отношение сигнал/шум за счет усреднения по строкам развертки ПЗС-матрицы.

Сравнивая полученные из интерферограмм спектры вторичного излучения различных веществ со спектрами вторичного излучения тех же веществ, полученными на дифракционном спектрометре, можно

сделать вывод об их качественном совпадении, при этом зашумленность сигнала в случае статического фурье-спектрометра меньше (при одинаковых условиях проведения эксперимента).

В результате проведенных экспериментов установлены оптимальные параметры регистрации интерферограммы для восстановления по ней спектра с максимальным разрешением. Установлено, что для восстановления сигнала оптимальное число пиксел на ширину полосы интерферограммы должно быть не менее четырех. Для сравнения спектров необходимо учитывать аппаратную функцию фурье-спектрометра, что позволит точнее определить соответствие между спектрами, полученными на разных спектрометрах. Это же позволит использовать уже имеющуюся базу спектров веществ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-02-12027-офи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов Г. Г. Направление развития фурье-спектрометрии // Санкт-Петербург. гос. ун-т технологий, механики и оптики. Научно-технический вестник. – 2004. – № 13. – С. 151–155.
2. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 380 с.
3. Морозов А. Н., Светличный С. И. Основы фурье-спектрорадиометрии. – М.: Наука, 2006. – 275 с.
4. Harvey A. H., Fletcher-Holmes D. W. Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer // Optics Express. – 2004. – Vol. 12. – No. 22. – P. 5368–5374.
5. Luet M., Boher P., Leroux T. Imaging polarization interferometer for flat panel display characterization // SID, 2004 digest. (<http://www.eldim.fr/library/eldim-publications>).
6. Zhang C., Xiangli B., Zhao B. Permissible deviations of polarization orientation in the polarization imaging spectrometer // Institute of physics publishing. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2004. – No. 6. – P. 815–817.
7. Дричко Н. М., Егорова Л. В., Таганов О. К. Малогабаритный статический фурье-спектрометр поляризационного типа // Опт. журнал. – 2006. – Т. 73. – № 12. – С. 51–56.
8. Ebizuka N., Wakaki M., Kobayashi Y., Sato S. Development of multichannel Fourier-transform spectrometer // Applied Optics. – 1995. – V. 34. – No. 34. – P. 7899–7906.
9. Padgett M. J., Harvey A. R., Duncan A. J., Sibbett W. Single-pulse, Fourier-transform spectrometer having no moving parts // Applied Optics. – 1994. – V. 33. – No. 25. – P. 6035–6040.
10. Hashimoto M., Kawata S. Multichannel Fourier-transform infrared spectrometer // Applied Optics. – 1992. – V. 31. – No. 28. – P. 6096–6101.
11. Carole C., Montarou T., Gaylord T. Analysis and design of compact, static Fourier-transform spectrometer // Applied Optics. – 2000. – V. 39. – No. 31. – P. 5762–5767.
12. Courtial J., Patterson B. A., Hirst W., Harvey A. R., Duncan A. J., Sibbett W. Padgett M. J. Static Fourier-transform ultraviolet spectrometer for gas detection // Applied Optics. – 1997. – V. 36. – No. 13. – P. 2813–2817.

13. Matthew P. D., Karim M. A. Solid-block stationary Fourier-transform spectrometer // *Applied Optics*. – 1996. – V.35, No. 1. – P. 84–89.
14. Rafer B. J., Sellars G. R., Blatt J. H. Monolithic Fourier-transform imaging spectrometer // *Applied Optics*. – 1995. – V. 34. – No. 31. – P. 7228–7230.
15. Егорова Л. В., Ермакова Д. С., Кувалкин Д. Г. и др. Малогабаритный статический фурье-спектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра // *ПТЭ*. – 1992. – № 2. – С. 208–209.
16. Marconi P. Early results from an imaging interferometer prototype operating in the Sagnac configuration // *ISPRS Congress Istanbul 2004*. – P. 130–136.
17. Arumana - Mugisha H., Ronald R. A. Fourier transform diode array spectrometer for the UV, visible, and near IR // *Applied Spectroscopy*. – 1985. – V. 39. – No. 4. – P. 693–697.
18. Harnisch B., Posselt W., Holota K., Tittel H. O., Rost M. Compact Fourier-transform imaging spectrometer for small satellite missions // *Acta Astronautica*. – 2003. – V. 52. – No. 9. – P. 803–811.
19. Стюард И. Г. Введение в фурье-оптику: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 182 с.

Статья поступила в редакцию 19.05.2009

Андрей Юрьевич Бойко родился в 1968 г., окончил СВВИУХЗ в 1990 г., канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Центрального научно-исследовательского испытательного института. Автор более 20 научных работ в области спектроскопии, оптической локации и прецизионных измерений.

A.Yu. Boiko (b. 1968) graduated from the Saratov Higher Military Engineering School for Chemical Defense in 1990. Ph. D. (Eng.), senior researcher, head of department of the Central Research and Development Testing Institute. Author of more than 20 publications in the field of spectroscopy, optical location and precision measurements.

Илья Семенович Голяк родился в 1986 г., студент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, бакалавр техники и технологий. Автор 2 научных работ в области оптики и спектроскопии.

И. S. Golyak (b. 1986) — student of the Bauman Moscow State Technical University, has bachelor’s degree in engineering and technologies. Author of 2 publications in the field of optics and spectroscopy.

Игорь Семенович Голяк родился в 1985 г., аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, магистр техники и технологий. Автор 4 научных работ в области оптики и спектроскопии.

И. S. Golyak (b. 1985) — post-graduate of "Physics" department of the Bauman Moscow State Technical University, has master’s degree in engineering and technologies. Author of 4 publications in the field of optics and spectroscopy.

Станислав Казимирович Дворук родился в 1958 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. Ведущий инженер Центра прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области прецизионных измерений.

S.K. Dvoruk (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. The leading engineer of Applied Physics Center of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications in the field of high precision measuring systems.

Алексей Михайлович Доровских родился в 1968 г., окончил Военный университет радиационной, химической и биологической защиты в 1999 г. Канд. хим. наук, начальник отдела Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов. Автор более 10 научных работ в области органической химии.

A.M. Dorovskikh (b. 1968) graduated from the Military University for Radiation, Chemical and Biological Protection in 1999. Ph. D. (Chem.), head of department of the Administration for Advanced Interspecific Research and Special Projects. Author of more than 10 publications in the field of organic chemistry.

Артём Александрович Есаков родился в 1984 г., ассистент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, магистр техники и технологий. Автор 4 научных работ в области оптики и спектроскопии.

A.A. Esakov (b. 1984) assistant of “Physics” chair Bauman Moscow State Technical University, master of technics and technologies Author of 4 publication in field of physical optics and spectroscopy.

Игорь Викторович Кочиков родился в 1959 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1982 г. Д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор более 50 научных работ в области математической физики и вычислительной математики.

I.V. Kochikov (b. 1959) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1982. Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of research computing center of the Lomonosov Moscow State University. Author of over 50 publications in the fields of mathematical physics and computing mathematics.

Владимир Николаевич Корниенко родился в 1966 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1989 г., канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИПЭ РАН. Автор более 50 научных работ в области вакуумной микроволновой электроники.

V.N. Kornienko (b. 1966) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1989. Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of the Institute for Radio Electronics of the Russian Academy of Sciences. Author of 50 publications in the field of vacuum microwave electronics.

Дмитрий Витальевич Косенко родился в 1985 г., студент кафедры “Системы и приборы стабилизации, ориентации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 2 научных работ в области оптики и спектроскопии.

D.V. Kosenko (b. 1985) — student of the Bauman Moscow State Technical University, has bachelor’s degree in engineering and technologies. Author of 2 publications in the field of optics and spectroscopy.

Андрей Николаевич Морозов родился в 1959 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области прецизионных измерений и физической кинетики.

A.N. Morozov (b. 1959) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, head of “Physics” Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of high precision measuring systems and physical kinetics theory.