

3. Дзюба А. С., Ионг Зу Ю. Взаимодействие газовых пузырьков с фронтом кристаллизации расплава // Кристаллография. 1985. Т. 30. С. 1177–1179.

4. Гегузин Я. Е., Дзюба А. С. Роль открытых включений переохлажденного расплава в формировании газовых пузырей в тылу фронта кристаллизации // Кристаллография. 1981. Т. 26. С. 577–581.

5. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 582 с.

6. Малюков С. П., Клунникова Ю. В. Моделирование распределения температуры в процессе роста монокристаллов сапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации в трехмерных координатах // Изв. ЮФУ. Технические науки. Тематический вып. «Нанотехнологии». 2011. № 4. С. 86–94.

7. Малюков С. П., Клунникова Ю. В. Оптимизация производства изделий из сапфира для электронной техники. Германия: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 151 с.

S. P. Malyukov, Y. V. Klunnikova

TEMPERATURES DISTRIBUTION SIMULATION IN THE SAPPHIRE CRYSTALS FOR DEFECTS FORMATION DIAGNOSTIC

The temperatures gradient for the sapphire crystals growth by the horizontal directed crystallization method is received. The three-dimensional mathematical simulation by the method of final volume on the unstructured grid was used. The estimation of gas bubbles sizes near the liquid crystallization front was made. This approach allows to solve such problem in the field of sapphire crystals growth as crystals reception with the reduced defects level.

Technological process, horizontal directed crystallization method, sapphire crystals, temperatures distribution

УДК 53.082.52

A. A. Ухов, Д. К. Кострин

**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ
МНОГОКАНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА**

Рассмотрена конструкция многоканального оптического спектрометра на основе ПЗС-фотоприемников. Показана возможность выравнивания чувствительности прибора во всем диапазоне длин волн. Предложен метод, позволяющий значительно уменьшить общее время регистрации спектра излучения.

Оптический спектрометр, ПЗС-фотоприемник, регистрация спектров

Основными требованиями, предъявляемыми к современному спектрометрическому оборудованию, являются широкий рабочий диапазон длин волн, высокая разрешающая способность, возможность панорамного изображения спектра и малое время регистрации [1]. В последние десятилетия получил развитие метод одновременного, многоэлементного спектрального анализа, в котором спектр излучения регистрируется одной или несколькими одномерными ПЗС-матрицами, каждая из которых содержит несколько тысяч фоточувствительных элементов. Благодаря электронной регистрации время получения спектров сократилось до нескольких миллисекунд, расширился спектральный диапазон измерений, исчез процесс расшифровки спектра, появились возможности анализа формы спектральных линий и ввода спектра в ЭВМ для его последующей автоматизированной обработки. Большинство спектроскопических методов нуждаются в панорамном наблюдении участка спектра или всего спектрального интервала 200...1100 нм с оптическим разрешени-

ем не хуже 1...2 нм для одноканальной системы. Для некоторых задач спектрального анализа требуется лучшее спектральное разрешение, что можно обеспечить применением многоканальной системы регистрации.

Основной частью оптического спектрометра является фотоприемник на основе ПЗС (ФПЗС) [2]. Для обеспечения его работы необходимо создать систему импульсных управляющих сигналов, подключить усилительные звенья, аналого-цифровой преобразователь и далее передать в цифровом виде в ЭВМ сигналы, снимаемые с каждого пикселя ПЗС-линейки. Очевидно, что управление столь сложной системой должно осуществляться с помощью микроконтроллера и весь электронный блок управления для уменьшения влияния помех на передаваемые сигналы должен находиться в непосредственной близости от оптического узла или внутри него. На рис. 1 приведена структурная схема электронной части прибора.

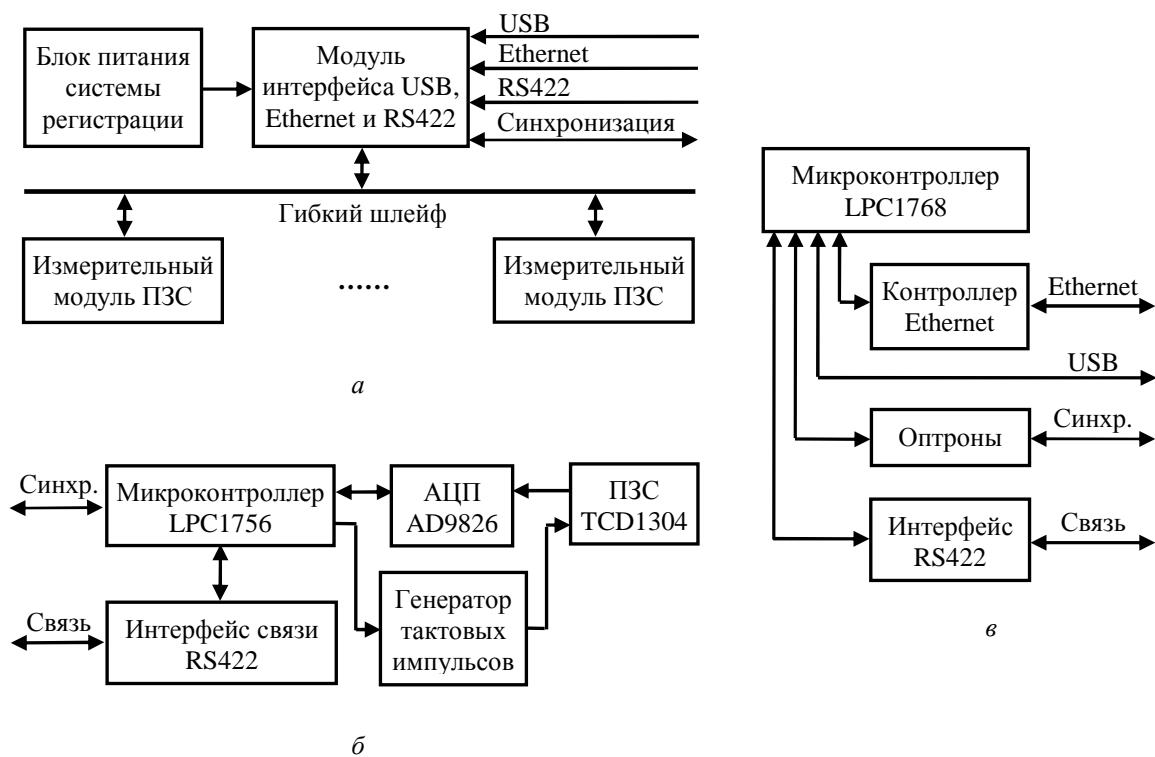


Рис. 1

Система регистрации (рис. 1, а) предназначена для опроса измерительных модулей с ФПЗС и передачи полученных спектральных данных в интерфейсную плату. В зависимости от требуемого спектрального диапазона и оптического разрешения в системе регистрации может использоваться от 1 до 32 модулей регистрации. Измерительный модуль (рис. 1, б) кроме ФПЗС содержит аналого-цифровой преобразователь, оцифровывающий сигналы всех пикселей ПЗС-линейки и передающий полученные значения в микроконтроллер. Модули регистрации могут содержать ФПЗС на УФ или видимую часть спектра либо другой фотоприемник на ИК-часть спектра.

Модуль интерфейса (рис. 1, б) обеспечивает связь спектрометра с ЭВМ (прием команд, ответ на запросы и передача спектральных данных). Интерфейсы связи предполага-

ют использование «стандартных» вычислительных средств. При необходимости могут быть реализованы и другие интерфейсы.

Использование большого числа измерительных модулей с ФПЗС в условиях ограниченных размеров оптического блока спектрометра накладывает жесткие ограничения на размеры используемых печатных плат и подразумевает компактное размещение элементов на них (рис. 2).

С одной стороны платы (рис. 2, *а*) расположен микроконтроллер, АЦП, каскад усиления-буферизации и разъем для подключения гибкого шлейфа, соединяющего плату с системой регистрации. С обратной стороны платы (рис. 2, *б*) размещена ПЗС-линейка и часть пассивных компонентов схемы.

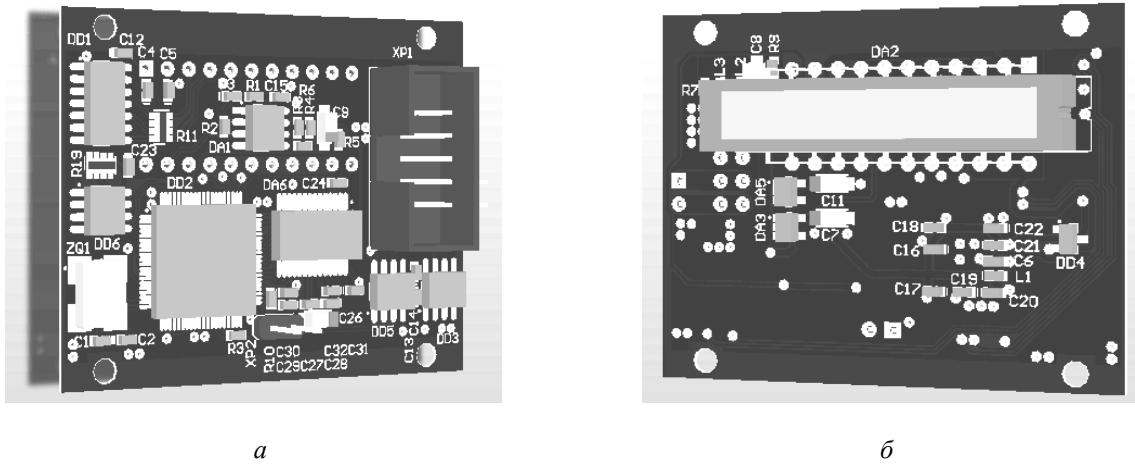


Рис. 2

Выбор ФПЗС в качестве основы для построения спектрометра обусловлен не только его высокой чувствительностью. Заряд, возникающий в каждом элементе секции накопления, пропорционален площади элемента, интенсивности падающего излучения и интервалу времени, в пределах которого сток заряда в потенциальную яму перекрыт с помощью затвора переноса. Таким образом, эффект взаимозаменяемости интенсивности и времени накопления создает широкие возможности для управления чувствительностью прибора с помощью цифровых устройств [3], [4]. Подобный способ позволяет снимать сигнал от источников с интенсивностями излучения, отличающимися в десятки раз. Необходимая продолжительность накопления заряда в ФПЗС связана с уровнем освещенности: чем ниже освещенность, тем продолжительнее должен быть период накопления для получения приемлемой амплитуды сигнала на выходе.

В рассматриваемом приборе ФПЗС используются без защитного стекла, так что его спектральная характеристика расширяется вплоть до 200 нм. При этом чувствительность I на длине волны $\lambda = 200$ нм будет, по меньшей мере, в 10 раз ниже, чем в максимуме (I_0) при $\lambda = 550$ нм (рис. 3). Следовательно, для сохранения примерно одинакового соотношения сигнал/шум во всем спектральном диапазоне требуется устанавливать большее значение чувствительности (времени накопления заряда (t_h) в ФПЗС) в УФ-области спектра по сравнению с видимой частью (рис. 4).

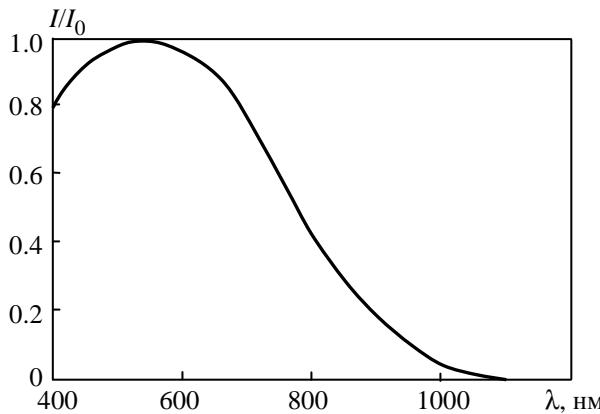


Рис. 3

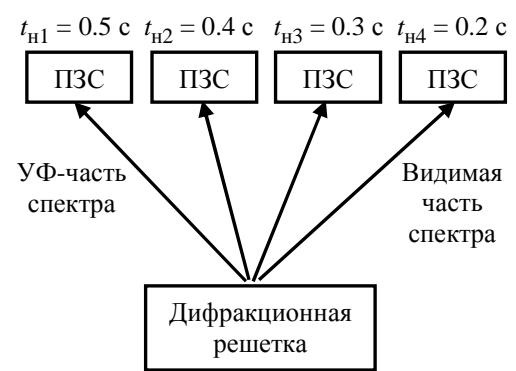


Рис. 4

Поскольку ФПЗС интегрирует падающий световой поток, то при исследовании импульсных источников излучения с короткими однократными вспышками время накопления не имеет значения и может быть выставлено на минимум, допустимый прибором. Если вспышки происходят многократно, то увеличение времени накопления приведет к интегрированию большего числа вспышек и, соответственно, к увеличению чувствительности. Следует иметь в виду, что в данном случае соотношение зарегистрированных энергий отдельных линий будет различным для разных ФПЗС (с разным временем накопления), и необходимо проводить калибровку с эталонами и измерение образцов с неизменными временами накопления. Таким образом, общую структуру процесса регистрации спектра с учетом различного времени накопления для разных спектральных участков можно описать в соответствии с рис. 5.

В системе с несколькими линейками возможна «конвейерная» организация процесса измерения и считывания информации. На измерение ПЗС-линейки запускаются практически одновременно, а окончание измерения для каждого ФПЗС будет индивидуальным. Та линейка, которая запрограммирована на минимальное время накопления, должна быть опрошена первой. В это время будет продолжаться процесс накопления на других ФПЗС. Следовательно, время чтения данных с линеек в ЭВМ хоть и не изменяется, но общее время процесса измерения будет значительно меньше, чем в режиме, когда вначале производится полное измерение и лишь затем последовательное считывание всего массива данных.

Чтение полных данных со всех ФПЗС необходимо при настройке и калибровке прибора. Однако процесс реального анализа спектральных данных на откалиброванном приборе подразумевает использование ограниченного числа характерных спектральных линий элементов, по которым и производится измерение. В этом случае нет необходимости передавать весь массив данных со всех ПЗС-линеек, поскольку большая его часть не будет использована. С другой стороны, после калибровки прибора положение (номера пикселей) используемых спектральных линий будет известно и для существенного сокращения времени передачи достаточно будет передать только требуемые фрагменты (рис. 6).

Время накопления заряда ФПЗС для каждой из линеек записывается во внутреннюю энергонезависимую память и устанавливается при следующем включении питания. Таким образом, если прибор работает при фиксированной неизменной чувствительности, то ее необходимо установить только один раз. Значение чувствительности должно выбираться

таким образом, чтобы максимальный сигнал (наиболее интенсивная спектральная линия) находился в диапазоне 30–80 % от максимально возможного уровня. При превышении уровня форма сигнала искажается и может войти в насыщение. При недостаточном уровне ухудшается соотношение сигнал/шум, что ведет к снижению точности измерений.

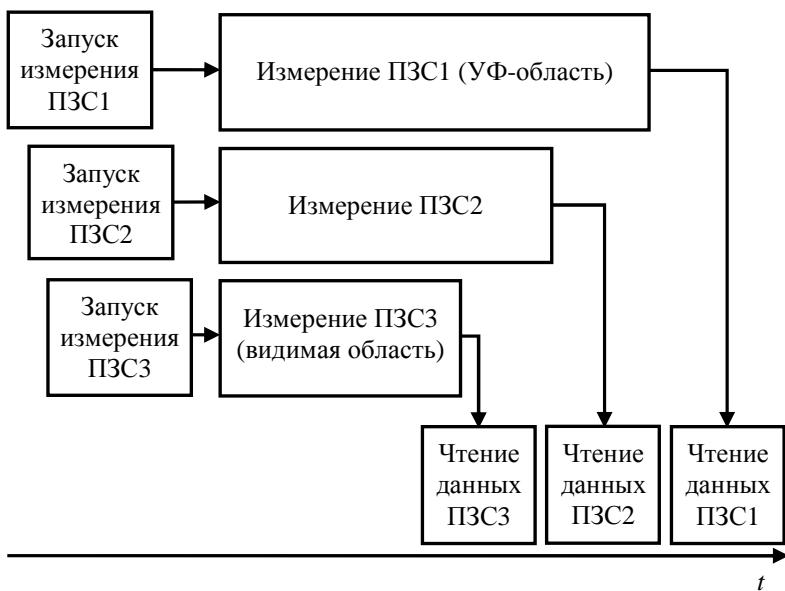


Рис. 5

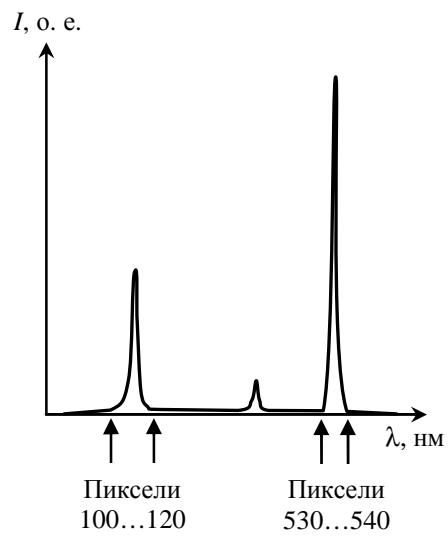


Рис. 6

Для оптимизации системы регистрации в многоканальных оптических спектрометрах первым следует запускать измерение с ПЗС-линейки с максимальным временем накопления для уменьшения общего времени регистрации. При этом передавая только отдельные спектральные линии, а не весь спектр целиком, можно успеть передать все необходимые данные до окончания накопления на следующей линейке и, таким образом, сократить итоговое время регистрации до значения, равного самому большому из времен накопления ФПЗС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 332 с.
2. Колгин Е. А., Ухов А. А., Савушкин А. В. Спектрометры на основе полихроматора и одномерной ПЗС-матрицы: опыт разработки и применения // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2. С. 120–126.
3. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
4. Кострин Д. К. Исследование линейности светосигнальной характеристики ПЗС-фотоприемника // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2. С. 86–91.

A. A. Uhov, D. K. Kostrin

OPTIMIZATION OF THE REGISTRATION SYSTEM OF MULTICHANNEL OPTICAL SPECTROMETER

The design of a multichannel optical spectrometer on the basis of a CCD photodetectors is considered. Possibility of alignment of device sensitivity in all ranges of wave lengths is shown. The method allowing considerable reduction of the overall registration time of spectrum is offered.

Optical spectrometer, CCD photodetector, registration of spectrums