

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРОВ
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В por-Si**

А. П. Оксанич, В. Н. Чебенко, М. Г. Когдась, Е. А. Паливода

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

В настоящее время объектом многочисленных исследований, является применение por-Si. Было установлено, что возможность управления в широких пределах пористыми слоями эффективного показателя преломления и диэлектрической проницаемостью позволяют создавать периодические структуры por-Si для микроэлектроники, наноэлектроники, оптоэлектроники и даже в технологии биосовместимых материалов. Использовался метод разложения спектров фотолюминесценции на гауссианы, который в отличии от существующих позволил производить анализ спектров фотолюминесценции por-Si с погрешностью $\pm 2\%$, что позволило автоматизировать процесс измерения спектров ФЛ por-Si с дискретностью измерения 0,1 нм, в диапазоне от 200 - 2000 нм. Выполнено расчет корреляционной зависимости между гауссианами спектров ФЛ por-Si для различных систем, коэффициент корреляции равен 0,98, что свидетельствует об адекватности получаемых данных на разработанной автоматизированной системе.

Ключевые слова: полупроводник, фотолюминесценция, пористость, возбуждение, пористый кремний.

**РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРІВ
ФОТОЛЮМІНІСЦЕНЦІЇ У por-Si**

А. П. Оксанич, В. М. Чебенко, М. Г. Когдась, Є. А. Паливода

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

В даний час об'єктом численних досліджень, є застосування por-Si. Було встановлено, що можливість управління в широких межах пористими шарами ефективного показника заломлення і діелектричної проникності дозволяють створювати періодичні структури por-Si для мікроелектроніки, наноелектроніки, оптоелектроніки і навіть в технології біосумісних матеріалів. Використовувався метод розкладання спектрів фотолюмінесценції на гауссіана, який на відміну від існуючих, дозволив проводити аналіз спектрів фотолюмінесценції por-Si з похибкою $\pm 2\%$, що дозволило автоматизувати процес вимірювання спектрів ФЛ por-Si з дискретністю вимірювання 0,1 нм, в діапазоні від 200 - 2000 нм. Виконано розрахунок кореляційно залежності між гауссіанами спектрів ФЛ por-Si для різних систем, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,98, що свідчить про адекватність одержуваних даних на розробленій автоматизованій паспортній системі.

Ключові слова: напівпровідник, фотолюмінесценція, поруватість, збудження, поруватий кремній.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ: В настоящее время объектом многочисленных исследований, является наноразмерная гетероструктура – пористый кремний (por-Si), в котором сочетаются наноразмерные области кремния и диэлектрических фаз оксида кремния и воздуха. Por-Si интересен как с научной, так и с практической точек зрения. Основным способом получения por-Si является метод электрохимического анодирования монокристаллического кремния. В качестве электролита обычно используют водно-спиртовые смеси плавиковой кислоты (HF: H₂O: C₂H₅OH) в различных соотношениях [1, 2]. Процесс электрохимического анодирования связан с миграцией, поэтому при травлении подложек n-типа для генерации достаточного количества дырок необходима дополнительная подсветка образца.

В зависимости от характерного размера пор согласно классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), por-Si принято разделять на макропористый ($d > 50$ нм), мезопористый ($2 < d < 50$ нм) и нанопористый ($d < 2$ нм).

Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) могут использоваться как непрерывные, так и импульсные лазеры сине-зеленого, фиолетового и ультрафиолетового диапазонов.

Кремний при уменьшении частиц до нанометровых размеров проявляет свойства, необычные

для объемных образцов этого материала, что вызывает к нему интерес, например, как к оптическому материалу [3].

По мере уменьшения размеров частиц por-Si ширина запрещенной зоны растет, и те поверхностные состояния, которые в кристаллическом кремнии находились за пределами запрещенной зоны, попадают в нее, что меняет спектр ФЛ. Тем самым размерный эффект и поверхность взаимосвязано влияют на оптические свойства por-Si.

Существуют две основные модели для объяснения люминесценции por-Si. Согласно одной из них, излучение накачки поглощается в объеме por-Si, а ФЛ является следствием излучательной рекомбинации на поверхности [4–7]. Другая модель предполагает, что люминесценция обусловлена присутствием на поверхности por-Si соединений типа силоксена, возникающих в процессе анодирования кремния [8].

Отличительной особенностью por-Si является значительный сдвиг края фундаментального поглощения света в коротковолновую сторону по отношению к кристаллическому Si и наличие интенсивной люминесценции в видимой области спектра [9, 10].

Спектральный диапазон ФЛ пористого кремния довольно широк: в зависимости от размеров пори степени окисления поверхности образцы por-Si

могут люминесцировать от красной до синей области спектра, при этом по мере окисления por-Si спектр ФЛ, как правило, сдвигается в синюю область спектра.

Одна из основных сложностей при измерениях ФЛ por-Si является необходимость усиления слабого сигнала ФЛ на фоне мощного излучения объектов исследуемых образцов, при комнатной температуре.

Обычно спектр ФЛ имеет довольно размытые параметры (100-200 нм) в длинах волн от 500-1000 нм, в следствии чего усложняется задача определения пика излучения ФЛ. Существующие методы измерения спектров ФЛ обладают довольно большой погрешностью измерения $\sim \pm 25\%$, что накладывает ограничения на контроль технологии получения por-Si .

Целью данной работы является разработка метода повышения точности определения пиков спектров ФЛ por-Si .

Задачи:

1. Разработать оптическую схему с использованием функциональных блоков, которые позволят повысить точность автоматизированной системы регистрации пиков спектров ФЛ.

2. Определить пиковые значения в спектре ФЛ por-Si для повышения точности измерения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Одним из направлений автоматизированного анализа результатов экспериментальных измерений является способ анализа спектров люминесценции, основанный на разложении их на гауссианы, путем подбора таких параметров гауссианов, при которых сумма квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений по всем экспериментальным точкам имеет минимальное значение. Этот способ используется во множестве научных и практических работ, например, в работе [11–13]. Минимизация суммы квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений широко применяется в математике при сопоставлении различных кривых, и основными достоинствами такого подхода являются простота и независимость от природы сопос-

тавляемых зависимостей. Последнее, однако, является и недостатком известного способа. В ряде случаев одинаковое по абсолютным значениям расстояние между кривыми не означает одинаковую близость физических процессов, описываемых этими кривыми. Подобный эффект имеет место, в частности, при измерении величин, принимающих целочисленные значения или значения, пропорциональные таковым. Действительно, если измеренная целочисленная величина имеет значение N , то погрешность ее равна \sqrt{N} . Поэтому, если на экспериментальной кривой одновременно встречаются целочисленные значения, заметно отличающиеся по величине, то и близость моделированной кривой к этим экспериментальным значениям должна быть различной: к экспериментальным точкам с малыми значениями N моделированная кривая должна быть существенно ближе, чем к экспериментальным точкам с большими значениями N . В известном способе анализа (сумма квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений) предполагается, что моделированная кривая проходит в одинаковой близости как от больших, так и от малых значений N , т.е. известный способ безразличен к значению N : он не учитывает погрешность определения целочисленных величин или величин, пропорциональных таковым. При измерении спектров люминесценции каждая экспериментальная точка, будучи пропорциональной целочисленному количеству зарегистрированных фотонов, имеет свою, как правило, отличную от других точек спектра, погрешность. По этой причине известный способ анализа люминесцентных спектров является неоптимальным для анализа спектров люминесценции, поскольку не учитывает индивидуальную погрешность каждой экспериментальной точки.

Для решения задачи анализа спектров ФЛ использовался метод разложения на гауссианы путем подбора таких параметров гауссианов, при которых выражение (1) принимает максимально возможное значение [13].

$$\sum_{i=1}^n \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi(A_i^{\text{эксн}}\eta(A_i^{\text{эксн}})/K + \sigma_{\text{шума}}^2)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{A_i^{\text{расч}} - A_i^{\text{эксн}}}{\sqrt{A_i^{\text{эксн}}\eta(A_i^{\text{эксн}})/K + \sigma_{\text{шума}}^2}} \right)^2 \right] \eta(A_i^{\text{расч}}) \right] \bigg/ \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(A_i^{\text{эксн}}\eta(A_i^{\text{эксн}})/K + \sigma_{\text{шума}}^2)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{A - A_i^{\text{эксн}}}{\sqrt{A_i^{\text{эксн}}\eta(A_i^{\text{эксн}})/K + \sigma_{\text{шума}}^2}} \right)^2 \right] dA \right] \quad (1)$$

где $A_i^{\text{эксн}}$ – значение амплитуды i -й экспериментальной точки в спектре люминесценции; $A_i^{\text{расч}}$ – значение расчетной амплитуды спектра люминесценции в точке с той же энергией или длиной волны, что и у i -й экспериментальной точки; K – коэффициент пропорциональности между амплитудой сигнала и количеством зарегистрированных фотонов; η – функция Хэвисайда; $\sigma_{\text{шума}}$ – стандартное отклонение погрешности измерения амплитуды сигнала, связанное с шумами аппаратуры.

С методической точки зрения измерение спектров люминесценции заключается в определении количества фотонов, испускаемых исследуемым образцом. Амплитуда сигнала $A_i^{\text{эксн}}(W)$ на выходе измерительной аппаратуры считается пропорциональной количеству зарегистрированных фотонов:

$$A^{\text{эксн}}(W) = K \cdot N(W), \quad (2)$$

где $N(W)$ – количество зарегистрированных фотонов; K – коэффициент пропорциональности между амплитудой сигнала и количеством зарегистрированных фотонов (зависит от особенностей построения измерительного тракта, его коэффициента усиления, включает в себя также эффективность регистрации фотонов с помощью ФЭУ).

Поскольку амплитуда сигнала $A^{эксн}(W)$ на выходе измерительной аппаратуры пропорциональна целочисленной величине $N(W)$, то погрешность измерения $A^{эксн}(W)$ должна быть пропорциональна $\sqrt{N(W)}$. Распределение во времени сигналов, соответствующих регистрируемому фотонам на выходе измерительного тракта, подчиняется распределению Пуассона, которое при количестве отсчетов $N > 30$ переходит в нормальное распределение.

Очевидно, что стандартное отклонение такого распределения имеет значение

$$\sigma_{счета(W)} = \sqrt{N(W)} = \sqrt{A^{эксн}(W) / K} . \quad (3)$$

В связи с тем, что в экспериментах по измерению спектров люминесценции количество регистрируемых фотонов в единицу времени, как правило, заметно превосходит 30, погрешность измерения амплитуды сигнала может быть описана в первом приближении следующим нормированным нормальным распределением:

$$p(A : A^{эксн}) = \frac{1}{\sigma_{счета} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A - A^{эксн}}{\sigma_{счета}} \right)^2 \right] . \quad (4)$$

На самом деле погрешность определения амплитуды сигнала зависит не только от амплитуды самого сигнала, но и от шумовых характеристик измерительного тракта. Если считать, что амплитудное распределение шума носит характер нормального

$$p(A^{расч}; A^{эксн}) = \frac{\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{A^{расч} - A^{эксн}}{\sigma} \right)^2 \right] \cdot \eta(A^{расч})}{\int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{A^{расч} - A^{эксн}}{\sigma} \right)^2 \right] dA^{расч}} . \quad (7)$$

Поскольку экспериментальный спектр представляет из себя набор пар значений $(W_i; A_i^{эксн})$, то для его сравнения с моделированным спектром последний должен быть представлен в виде аналогичного набора данных, т.е. в виде пар значений $(W_i; A_i^{расч})$. Значение $A_i^{расч}$ получается из выражения (4) путем подстановки соответствующего значения энергии: $A_i^{расч} = A^{расч}(W_i)$. Таким образом, формируются ряды данных $(W_i; A_i^{эксн}; A^{расч}(W_i))$, которые и подлежат сравнению между собой.

Соответствие моделированной и экспериментальной кривых определяется как одновременное соот-

распределения со стандартным отклонением $\sigma_{шума}$, то суммарное стандартное отклонение равно:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{счета}^2 + \sigma_{шума}^2} . \quad (5)$$

Шумы аппаратуры, будучи распределенными вокруг нуля, могут формировать как положительные, так и отрицательные (не имеющие физического смысла при пересчете в число фотонов) сигналы. По этой причине, если экспериментальная точка имеет отрицательную амплитуду, то погрешность амплитуды такой точки определяется только шумовой составляющей, т.е. число фотонов, сформировавших такой отсчет, равно нулю ($N=0$). Математически данное предположение может быть записано с использованием функции Хэвисайда $\eta(x)$, которая равна нулю при $x < 0$ и равна единице при $x \geq 0$:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{счета}^2 \cdot \eta(A^{эксн}) + \sigma_{шума}^2} = \sqrt{A^{эксн} \cdot \eta(A^{эксн}) / K + \sigma_{шума}^2} . \quad (6)$$

Тогда вероятность соответствия некоторого значения амплитуды A значению амплитуды $A^{эксн}$ может быть представлена формулой (4).

Однако, если величина A – это расчетное (моделированное) значение $A^{расч}$, она не может быть отрицательной по физическому смыслу. По этой причине в выражение (7) необходимо ввести дополнительный множитель в виде функции Хэвисайда, который будет приравнивать к нулю вероятность соответствия значения амплитуды $A^{расч}$ значению $A^{эксн}$ в случае отрицательных значений величины $A^{расч}$. Введение дополнительного множителя приводит к необходимости перенормировки функции $p(A^{расч}; A^{эксн})$, поскольку он отсекает значения с $A < 0$:

ветствие расчета и эксперимента в каждой точке W_i (в точке W_1 , и в точке W_2 , и в точке W_3 и так далее до точки W_n), т.е. как произведение вероятностей соответствия $p(A^{расч})$ в каждой отдельной точке:

$$P = \prod_{i=1}^n p(A_i^{расч}; A_i^{эксн}) = \prod_{i=1}^n (A^{расч}(W_i); A_i^{эксн}) , \quad (8)$$

где n – количество экспериментальных точек. Чем больше соответствие между моделированной и экспериментальной кривыми, тем большее значение приобретает показатель P . Однако применение для вычисления показателя P формулы типа (8), т.е. формулы, содержащей произведение n членов, неудобно на практике. По этой причине произведение n членов заменяется на сумму следующим образом:

$$P = \prod_{i=1}^n p(A^{расч}(W_i); A_i^{эксн}) = \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \ln [p(A^{расч}(W_i); A_i^{эксн})] \right\}, \quad (9)$$

а требование $P \rightarrow \max$ рассматривается как требование:

$$\sum_{i=1}^n \ln [p(A^{расч}(W_i); A_i^{эксн})] \rightarrow \max. \quad (10)$$

Таким образом, суть способа сводится к подбору таких параметров моделируемого спектра, при которых выполняется выражение (10). Подбор выполняется стандартными методами многопараметрической оптимизации, например, методом Ньютона.

Дополнительным преимуществом предлагаемого способа анализа спектров фотолюминесценции является возможность его применения для ряда других видов измерений, заключающихся в регистрации целочисленных величин или величин, пропорциональных таковым, например, при анализе кинетик затухания люминесценции.

Для достижения поставленных задач и реализации предложенного метода разработана оптическая схема автоматизированной системы, которая представлена на рис. 1.

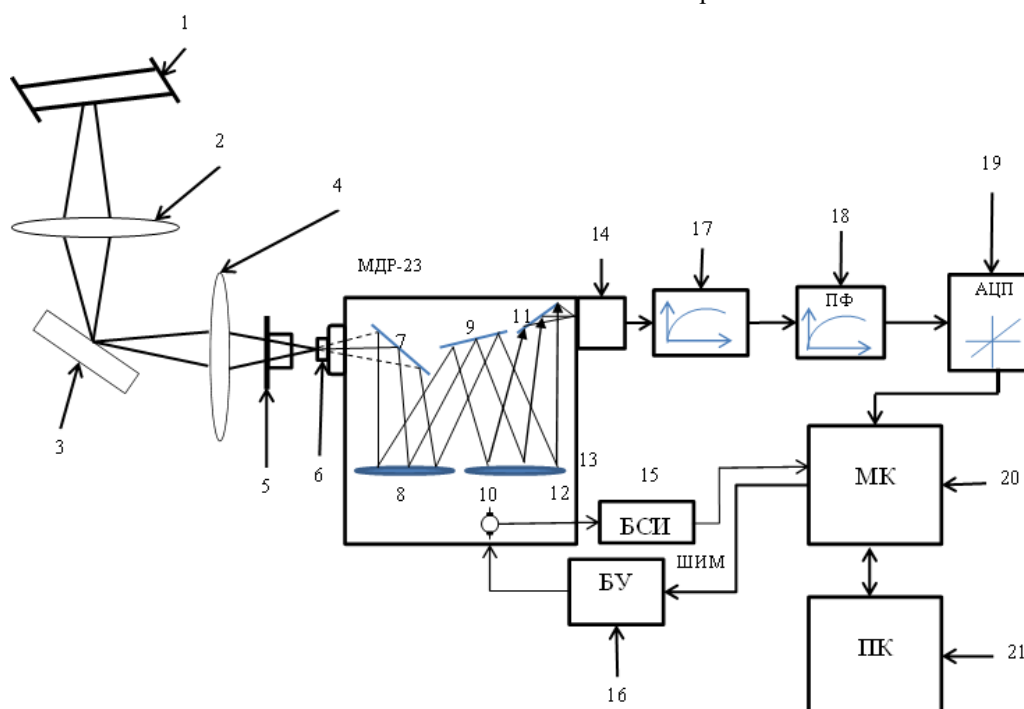


Рисунок 1 – Оптическая схема автоматизированной системы регистрации спектров ФЛ:

- 1 – источник излучения (лазер); 2 –фокусирующая линза; 3 –образец; 4 –фокусирующая линза; 5 –модулятор; 6 –входная щель монохроматора; 7, 11–плоские зеркала; 8, 12–сферические зеркала; 9 –дифракционная решетка; 10–ШД; 13–решеточный монохроматор; 14 – ФЭУ; 15–блок считывания информации; 16–блок управления; 17 – преобразователь I/U; 18 – полосовой фильтр (ПФ); 19 – АЦП; 20–микроконтроллер; 21–персональный компьютер

Первым компонентом любой системы измерения спектров фотолюминесценции является источник накачки. Чаще всего с этой целью используется лампы (ртутные, ксеноновые), в предложенной авторами схеме для возбуждения ФЛ используется УФ-лазер (1), т.к. он позволяет получить мощный сфокусированный пучок излучения. Другой причиной использовать лазер является простота удаления его излучения из измеряемого спектра фотолюминесценции. Дело в том, что часть используемого для накачки света всегда рассеивается поверхностью, при этом рассеянный свет смешивается с излучением, испускаемым самим исследуемым образцом (3). В результате на измеряемом спектре к фотолюминесценции исследуемой структуры добавится спектр излучения источника накачки, причём это «паразитное» излучение, как правило, будет во много раз

сильнее полезного. Если спектр излучения источника накачки довольно узкий, то его достаточно легко удалить при помощи светофильтра. В противном случае, когда спектр источника накачки перекрывает измеряемый спектр ФЛ, выделение полезного сигнала становится довольно сложной задачей.

Для дополнительной фокусировки лазерного излучения, а также для упрощения настройки оптической системы использовалась собирающая линза (2, 4). Электромеханический модулятор (5) осуществляет преобразование постоянного излучения лазера в изменяющееся во времени по синусоидальному закону (с частотой колебаний 1 кГц).

При проведении измерений при комнатной температуре использовался держатель для образца с возможностью линейной трансляции в двух направлениях. Фокусирующая линза (4 на рис. 1) собирает

излучаемое образцом излучение и фокусирует его на входную щель монохроматора (6).

В автоматизированной системе использовался монохроматор (13) МДР-23, в котором за счёт дифракции осуществляется выделение излучения с определенной длиной волны. Длина волны света, попадающего на выходную щель, определяется углом падения света на дифракционную решётку. В использованном монохроматоре поворот дифракционной решётки осуществляется при помощи шагового двигателя (ШД), который управляется при помощи компьютера.

МДР-23 работает в диапазоне длин волн от 200 до 2500 нм., использовалась дифракционная решетка имеет с 1200 штрихами на 1 мм, а также имеет обратную линейную дисперсию, которая составляет 1,3нм/мм. В рамках работы измерения проводились в диапазоне длин волн от 350 до 1000 нм.

Из выходной щели монохроматора свет попадает на фотоэлектрический умножитель (14) (фотоприемник).

Для управления ШД монохроматора и преобразования аналогового сигнала с выхода фотоприемника (14) разработано устройство, включающее в себя: усилитель сигнала (17); полосовой фильтр (18); аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (19); логику (15) и силовой блок управления ШД монохроматора (16).

Особенностью разработанной автоматизированной системы является полосовой фильтр 4 порядка (18), который позволил устранить все низко- и высоко- частотные шумы и позволил выделить полезный сигнал ФЛ на частоте 1 кГц, также для повышения точности определения пиков спектра ФЛ использовалась обратная связь в системе управления ШД монохроматора, которая позволила реализовать поворот дифракционной решетки с дискретностью 0,1 нм.

Разработанное устройство выполнено на основе микроконтроллера ATmega2560, позволяющее устанавливать заданное значение длины волны, выделяемой монохроматором, а также производить обработку сигнала, поступающего с выхода фотоприемника на АЦП с последующей отправкой данных на персональный компьютер.

Блок интерфейса имеет опторазвязку порта микроконтроллера от силовой части, которая обеспечивает защиту порта МК в случае аварийной ситуации.

Для реализации системы управления исполнительными механизмами использовались силовые МОП-транзисторы, рассчитанные на конкретные технические параметры работы установки.

Управляющая программа имеет следующий алгоритм работы (рис. 2). При запуске программы считываются параметры из блока «Настройка длины волны» и записываются в микроконтроллер. Также программа может установить дополнительные настройки из блоков «Решетка», в котором можно выбрать размер решетки и «Скорость» - выбрать или задать скорость вручную. При получении соответствующей команды от микроконтроллера, программа выводит данные на график. Следующим пунктом является проверка програм-

мы на нажатие кнопки «Стоп», либо на значение длины волны, равное максимуму. Если данные условия выполнены, то программа завершает работу и сохраняет данные, иначе ожидает команды от микроконтроллера.

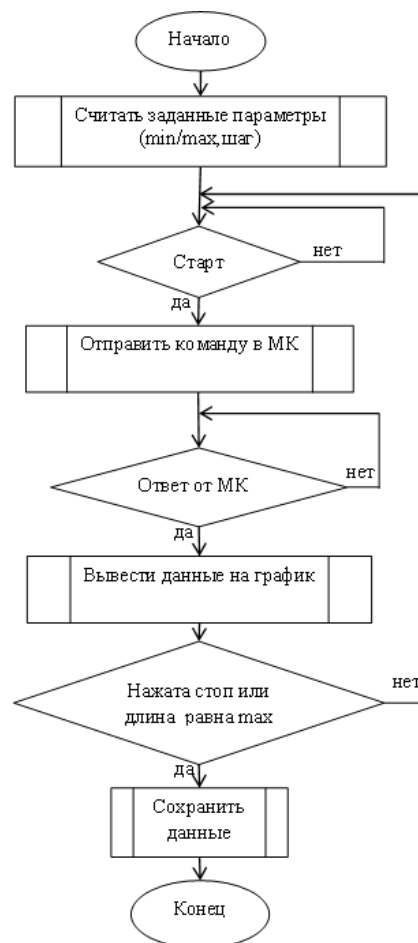


Рисунок 2 – Алгоритм работы программы с использованием ПК

После получения команды от компьютера микроконтроллер производит поворот дифракционной решетки на заданный угол с помощью ШД-монохроматора, который обеспечивает развертку спектра, затем происходит оцифровка сигнала, зарегистрированного фотоприемником, установленным за выходной щелью монохроматора, и осуществляется передача значений зарегистрированного сигнала и соответствующее значение длины волны на компьютер. В процессе регистрации спектра МК постоянно находится в режим ожидания команды от управляющей программы.

Блок управления реализован в комплекте с программным обеспечением, разработанного в среде NI LabView на языке G позволяющим в операционной системе Windows управлять монохроматором.

Предлагаемое программное обеспечение позволяет: производить перемотку в ручном режиме с заданной скоростью; производить перемотку на заданное значение длины волны; осуществлять регистрацию спектра в заданном диапазоне длин волн с заданной скоростью; сохранять полученный спектр в текстовый файл для последующей обработки.

На рис. 3 показано «ГЛАВНОЕ ОКНО» программы, которое содержит график для отображения получаемых спектров люминесценции, а также

средства, для масштабирования и управления графиком.

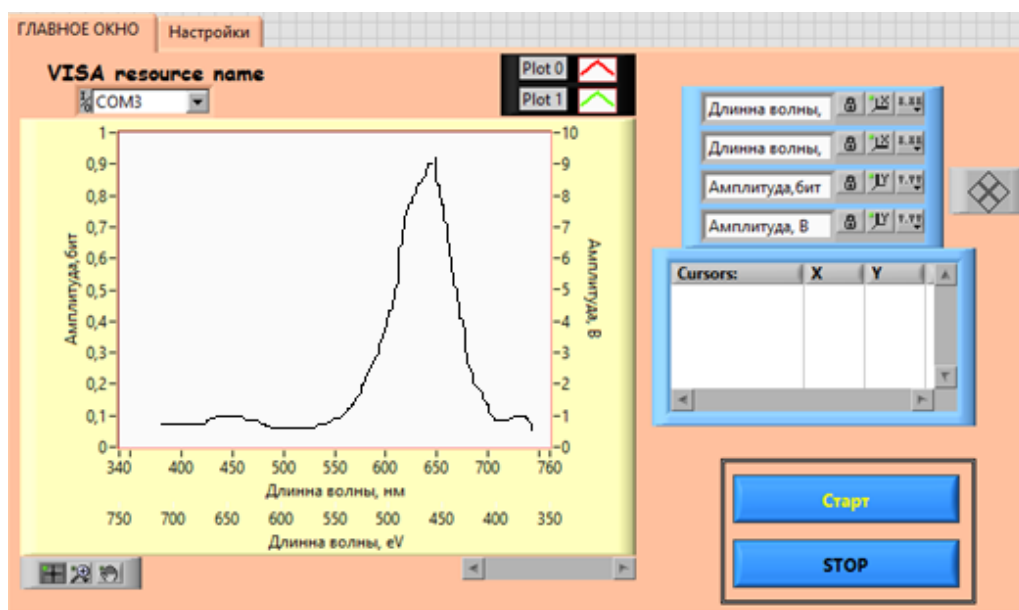


Рисунок 3 – Главное окно программы

На вкладке «Настройки» находятся блоки, ответственные за настройку, управление и отображение текущего состояния.

Блоки позволяют задавать параметры управления шаговым двигателем монохроматора, а также контролировать поворот дифракционной решетки на заданное значение длины волны.

Также пользователю доступна настройка следующих параметров:

- возможность установки параметров используемой в монохроматоре дифракционной решетки.
- задание скорости сканирования спектра ФЛ из предлагаемых вариантов или задать ее вручную.
- возможность установки и просмотра значения длин волн.

Для осуществления спектральных измерений необходимо выполнить следующие действия:

- 1) выбрать текущий тип установленной в монохроматоре решетки;
- 2) выбрать скорость сканирования;
- 3) выбрать диапазон длин волн для сканирования;
- 4) нажать кнопку «Старт».

После нажатия кнопки «Старт» монохроматор будет переведен в состояние, соответствующее начальной длине волны диапазона сканирования и начнет сканирование спектра с заданной скоростью. В процессе сканирования спектр вырисовывается в основном окне программы. После окончания сканирования предусмотрена возможность детального просмотра спектра, для этого необходимо, в главном окне программы, с помощью блоков, расположенных в правой части, выбрать необходимый инструмент работы с графиком и мышью выделить интересующий участок спектра.

Полученный спектр можно распечатать на принтере, а также сохранить в текстовом файле,

например, в Microsoft Excel. При сохранении в текстовый файл полученных данных существует возможность записи в файл дополнительных параметров, характеризующих эти данные.

Измерения ФЛ проводилось на образцах por-Si полученных анодным травлением пластин Si n-типа в спиртовом растворе HF при плотности тока 50 мА/см². ФЛ возбуждалась светом УФ лазера ($\lambda_{exc} = 405 \text{ nm}$).

Измерения ФЛ проводились на разработанной автоматизированной системе и спектрофотометре «UV-1800 SHIMADZU». Результаты измерений представлено на рис. 4. Можно видеть, что полученные данные на различных установках почти идентичны, что подтверждает корректность получаемых данных на разработанной автоматизированной системе регистрации спектров ФЛ.

При анализе полученных данных и определения пиков ФЛ использовался предложенный выше метод разложения спектра ФЛ на гауссианы, суть которого заключалась в подборе параметров, при которых выражение (1) принимало максимальное значение. Данный метод позволил производить анализ, с учетом погрешности измерения амплитуды сигнала, связанной с шумами аппаратуры.

Результаты анализа спектров ФЛ por-Si представлено на рис. 5. Из полученных данных отчетливо видно наличие пика спектра излучения ФЛ por-Si на длине волны 650 нм.

Для подтверждения достоверности полученных авторами данных было выполнено расчет корреляционной зависимости между значениями гауссиан полученных на различных установках. Полученный коэффициент корреляции составил $R^2=0,98$ (рис. 6), что свидетельствует о адекватности получаемых данных на разработанной авторами автоматизированной системе.

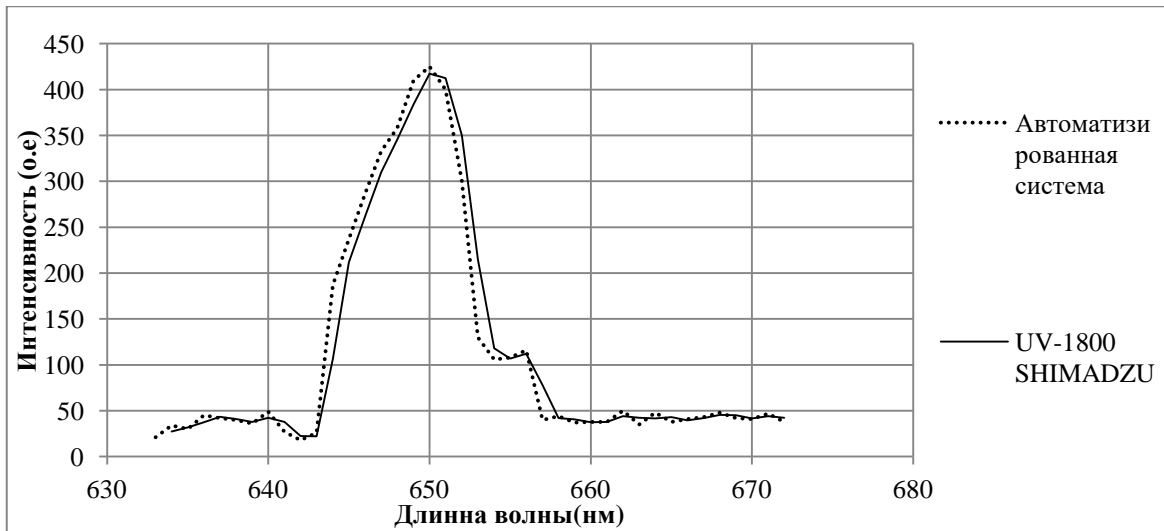


Рисунок 4 – Результаты измерения спектров ФЛ p-type Si

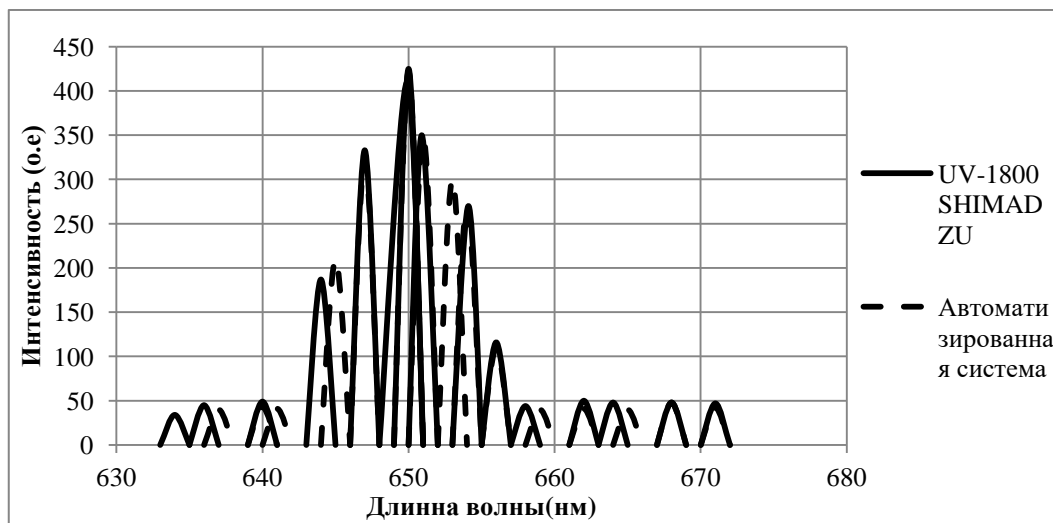


Рисунок 5 – Спектры ФЛ p-type Si разложенные на гауссианы

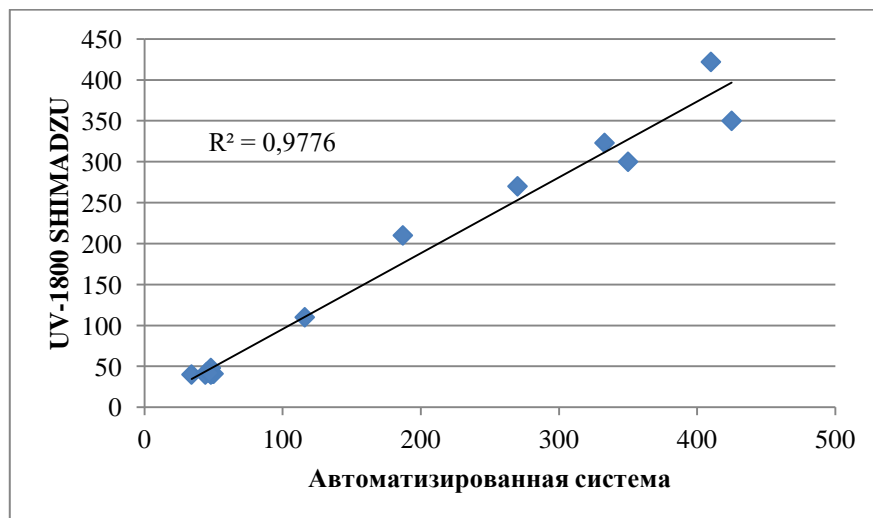


Рисунок 6 – График зависимости между гауссианамиспектров ФЛ p-type Si, полученных на различных системах

ВЫВОДЫ: 1. Получил дальнейшее развитие метод разложения спектров фотолуминесценции на гауссианы, который в отличии от существующих позволил производить анализ спектров фотолуминесценции p-type Si с погрешностью $\pm 2\%$, что

позволило автоматизировать процесс измерения спектров ФЛ p-type Si с дискретностью измерения 0,1 нм, в диапазоне от 200-2000 нм.

2. Уточнены научные данные о ФЛ в p-type Si полученного анодным травлением. Показано что пик

спектра излучения ФЛ пор-Si находится на длине волны 650 нм.

3. Выполнено расчет корреляционной зависимости между гауссианами спектров ФЛ пор-Si для различных систем, коэффициент корреляции равен 0,98, что свидетельствует о адекватности получаемых данных на разработанной автоматизированной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lehmann V., Stengl R., Luigart A. On the morphology and the electrochemical formation mechanism of me-soporous silicon // Mater. Sci. Eng. B, 2000. – V. 70. – PP. 11–22.
2. Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.DJ. The structural and luminescence properties of porous silicon // J. Appl. Phys. 1997. – V. 82. – № 3. – 909 pp.
3. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. – № 10. – 1046 pp.
4. Fedorenko L.L. et al. Relaxation spectra of photoluminescence from porous silicon obtained by chemical etching of lasemodified silicon // Semiconductors. – 1997. – V. 31. – № 1. – PP. 4–7.
5. G.G. Qin, I.Q. Jia. Sol. St. Commun., 86, 559 (1993).
6. J. Kanemitsu, H. Uto, J. Masumoto. Phys. Rev. B, 48, 2827 (1993).
7. F. Koch, V. Petrova-Koch, T. Muschik, A. Nicolov, V. Gavrilenko. Mater. Res. Soc. Symp., 283, 197 (1993).
8. H.D. Fuchs, M. Stutzmann, M.S. Brandt, M. Rosenbauer, J. Weber, A. Breitchwerdt, P. Deak, M. Cardona. Phys. Rev.B, 48, 8172 (1993).
9. С.В. Свечников, А.В. Саченко, Г.А. Сукач, А.М. Евстигнеев, Э.Б. Каганович. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., вып. 27, 3 (1994).
10. L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., 57, 1046 (1990).
11. С.П. ЗИМИН. ФТП, 34, 359 (2000).
12. O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi. Surf. Sci. Rep., 38, 1 (2000).
13. Luminescence spectroscopy of NaF:U bulk and fiber crystals / B. Shulgin, A. Tcherepanov, V. Ivanov, T. Koroleva, M. Kidibaev, Ch. Pedrini, Ch. Dujardin // Journal of Luminescence. – 2007. – Vol. 125, Iss. 1-2. – PP. 259–265.

DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEM FOR DETERMINING PHOTOLUMINESCENCE SPECTRUM IN THE POR-SI

A. Oksanich, V. Chebenko, M. Kogdas', E. Palivoda

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

Purpose. Development of a method to improve the accuracy of determining the peak photoluminescence spectra of por-Si is a an actual task, both in terms of science and industry. The solution allowed to determine peaks in the photoluminescence spectrum of por-Si to improve the measurement accuracy. Problem solution allowed to determine peaks in the photoluminescence spectrum of por-Si to improve the measurement accuracy. **Methodology.** We used the method of expansion in the photoluminescence spectra Gaussian, which helped reduce the error analysis of the spectra of por-Si of photoluminescence up to $\pm 2\%$, which made it possible to automate the process of measuring photoluminescence spectra of por-Si with a measurement resolution of 0.1 nm in the range of 200-2000nm. **Results.** From the experimental data, we can conclude that designed optical scheme using function blocks that have improved the accuracy of the automated registration system peak photoluminescence spectra. **Originality.** Refined scientific data on the photoluminescence in por-Si obtained by anodic etching. It is shown that the emission spectrum of photoluminescence peak por-Si is at a wavelength of 650nm. **The practical value.** The proposed method will improve the quality produced by por-Si, which is used in the manufacture of various gas sensors.

Key words: semiconductor, photoluminescence, porosity, agitation, porous silicon.

REFERENCES

1. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. № 10. P. 1046.
2. Lehmann V., Stengl R., Luigart A. On the morphology and the electrochemical formation mechanism of me-soporous silicon // Mater. Sci. Eng. B. 2000. V. 70. P. 11–22.
3. Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.DJ. The structural and luminescence properties of porous silicon // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. № 3. P. 909.
4. Fedorenko L.L. et al. Relaxation spectra of photoluminescence from porous silicon obtained by chemical etching of lasemodified silicon // Semiconductors. 1997. V. 31. № 1. P. 4–7.
5. G.G. Qin, I.Q. Jia. Sol. St. Commun., 86, 559 (1993).
6. J. Kanemitsu, H. Uto, J. Masumoto. Phys. Rev. B, 48, 2827 (1993).
7. F. Koch, V. Petrova-Koch, T. Muschik, A. Nicolov, V. Gavrilenko. Mater. Res. Soc. Symp., 283, 197 (1993).
8. H.D. Fuchs, M. Stutzmann, M.S. Brandt, M. Rosenbauer, J. Weber, A. Breitchwerdt, P. Deak, M. Cardona. Phys. Rev.B, 48, 8172 (1993).
9. S.V. Svechnikov, A.V. Sаченко, G.A. Sukach, A.M. Evstigneev, E.B. Kaganovich. Optoelectron. and semiconductor equipment. tech., vol. 27, 3 (1994).
10. L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., 57, 1046 (1990).
11. S. P. Zimin. FTP, 34, 359 (2000).
12. O.Bisi. S.Ossicini, L.Pavesi. Surf. Sci. Rep., 38, 1 (2000).
13. Luminescence spectroscopy of NaF:U bulk and fiber crystals / B.V.Shulgin, A.N.Tcherepanov, V.Yu. Ivanov, T.S.Koroleva, M.M.Kidibaev, Ch. Pedrini, Ch. Dujardin // Journal of Luminescence. 2007. Vol.125, Iss. 1-2. P.259-265.

Стаття надійшла 04.10.2016.