

2) отсылает команду, посланную для движения, мобильному роботу;

3) получает результат в виде реального перемещения робота.

Кроме этого, разрабатываемая система предлагает дополнительную функциональность в виде синхронизации с системой самообучения по времени, что позволяет выявлять и анализировать возникающие задержки работы систем.

### **ПОДГОТОВКА ДЛЯ РАБОТЫ С СИСТЕМОЙ**

Для начала работы с системой пользователю необходимо задать модель распознавания робота. От пользователя требуется ввести габариты робота, количество и координаты центров квадратных паттернов, а также координаты левого верхнего угла паттерна, расположенного в центре на рисунке 1. Под координатами понимаются плоские координаты с точкой отсчета, взятой за левый нижний угол робота (см. рис. 1).

От пользователя требуется так же добавить в систему самообучения функциональность, позволяющую передавать эталонную и получать реальную траекторию робота. Кроме этого, возможно добавление функциональности проводящей синхронизацию внутреннего времени работы систем. Для синхронизации используется алгоритм, состоящий из двух шагов.

На последнем этапе пользователь калибрует камеру, с помощью паттерна шахматной доски, стандартного для калибровки. Для пользователя процесс калибровки заключается в перемещении доски в плоскости пола в пределах видимости камеры. На основе полученных данных модуль детектирования производит автоматическую проекцию координат распознаваемых паттернов в плоскость пола [2].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагаемая система может применяться не только для автоматизации систем самообучения мобильных роботов, так же возможная область применения системы – калибровка кинематического аппарата роботов, разрабатываемых серийно. Необходимость калибровки возникает в первую очередь в связи с погрешностями, связанными с несовершенством механической составляющей робота. Данная проблема характерна даже для высококачественных двигателей и редукторов.

### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Дунец, И.П. Принципы работы системы детектирования автономного мобильного робота и препятствий для его движения // Современные проблемы математики и вычислительной техники: материалы VI Республиканской научной конференции молодых учёных и студентов, Брест, 26-28 ноября 2009 г. – Брест: БрГТУ, 2009. – С. 38-41.

2. Gary Bradski and Adrian Kaehler. Learning OpenCV. – Published by O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472. – 2008. – P. 405-412.

УДК 535.337

**Ивенкова О.А.**

**Научный руководитель: ст. преподаватель Тарасюк Н.П.**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСИТОННЫХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ**

#### **Введение**

В последние десятилетия наблюдается бурное развитие опто- и квантовой электроники. В связи с этим повышается совершенство применяемых полупроводниковых кри-

сталлов. В исследовании полупроводников особое место занимают оптические методы, отличающиеся высокой точностью и надежностью, большой информативностью. Экситонная спектроскопия (отражение, поглощение и люминесценция) представляет собой весьма чувствительный метод для исследования поверхностных и объемных свойств полупроводников: поверхностных состояний, безэкситонного или нарушенного приповерхностного слоя, процессов дефектообразования при различных видах воздействия.

Для анализа спектров в области экситонного резонанса наибольшее распространение получил метод подгонки вычисляемых по формулам Френеля кривых экситонного отражения к экспериментальным спектрам [1]. Таким методом можно оценить все основные параметры свободных экситонов: резонансную энергию экситонного осциллятора  $E_0$ , параметр затухания  $\Gamma$ , фоновую диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_0$ , поляризуемость  $4\pi\alpha$ . Влияние поверхности можно учесть введением приповерхностного безэкситонного ("мертвого") слоя, наличие которого приводит к интерференционным эффектам и трансформации контура полосы отражения [2].

Трехкомпонентное соединение  $\text{CuInSe}_2$  относится к группе полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  и кристаллизуется в структуре халькопирита. Соединение  $\text{CuInSe}_2$  является прямозонным полупроводником с чрезвычайно большим коэффициентом оптического поглощения  $\sim (3-6) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  и считается перспективным материалом для изготовления высокоэффективных солнечных элементов. К настоящему времени  $\text{CuInSe}_2$  – одно из наиболее исследованных соединений группы полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ , однако многие его свойства, и прежде всего оптические, изучены недостаточно. В большинстве случаев данные о фундаментальных параметрах и энергетической зонной структуре  $\text{CuInSe}_2$  материала противоречивы или вообще отсутствуют [1].

GaN относится к группе  $\text{A}^{\text{III}}\text{BV}$  и применяется в производстве голубых полупроводниковых лазеров, которые используются для чтения дисков большой емкости Blu-Ray DVD.

Далее рассмотрим расчет экситонных спектров отражения  $\text{CuInSe}_2$  с помощью одноосцилляторной модели с учетом "мертвого" слоя, а также спектров отражения GaN с помощью двухосцилляторной модели при различных температурах.

### Вычисление коэффициента отражения

У поверхности полупроводника существует область, где экситонное состояние сильно возмущено. Такую область естественно назвать переходным экситонным слоем (ПЭС). Ту часть ПЭС, где экситоны практически полностью подавлены, можно назвать безэкситонным или "мертвым" слоем у поверхности [3,4]. Одним из наиболее распространенных теоретических описаний свойств кристалла является модель однородного "мертвого" слоя, предложенная Холфилдом и Томасом [2].

Принимается, что "мертвый" слой однороден по толщине и, помимо параметра  $d$ , характеризуется вещественным показателем преломления, равным, например, фоновому  $n_0 = \sqrt{\epsilon_0}$  (рис. 1, область II). Объем кристалла (рис. 1, область III) характеризуется комплексным показателем преломления  $\tilde{n}(\omega)$ .

В одноосцилляторной модели коэффициент отражения будет иметь вид [1]

$$R(\omega) = |\tilde{r}(\omega)|^2, \quad (1)$$

$$\tilde{r}(\omega) = \frac{\Gamma_{12} + \tilde{r}_{23}(\omega)e^{2i\beta}}{1 + \Gamma_{12}\tilde{r}_{23}(\omega)e^{2i\beta}}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0 d. \quad (2)$$

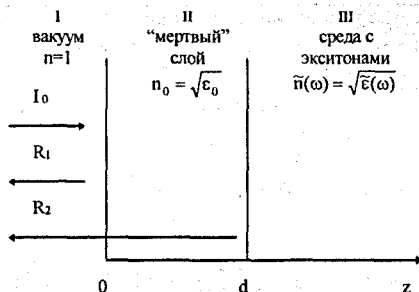


Рисунок 1 – Модель переходного экситонного слоя, содержащая однородный “мертвый” слой с показателем преломления  $n_0$  и толщиной  $d$

Для случая нормального падения света коэффициенты  $r_{12}$  и  $\tilde{r}_{23}(\omega)$ , связанные с отражением соответственно на границах I и II, II и III, будут иметь вид

$$r_{12} = \frac{n - n_0}{n + n_0}, \quad \tilde{r}_{23}(\omega) = \frac{n_0 - \tilde{n}(\omega)}{n_0 + \tilde{n}(\omega)}. \quad (3)$$

Диэлектрическая проницаемость  $\tilde{\epsilon}(\omega)$  имеет вид [5]

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_0 + \frac{4\pi\alpha_0\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma} \quad (4)$$

и

$$\tilde{n}(\omega) = \sqrt{\tilde{\epsilon}(\omega)} \quad (5)$$

В двухосцилляторной модели [6] коэффициент отражения вычисляется по формуле (1) путем замены в формуле (5)  $\tilde{\epsilon}(\omega)$  на

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_0 + \frac{4\pi\alpha_{0A}\omega_{0A}^2}{\omega_{0A}^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_A} + \frac{4\pi\alpha_{0B}\omega_{0B}^2}{\omega_{0B}^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_B}, \quad (6)$$

где индексы A и B относятся соответственно к A- и B- экситонам.

### Фитинг и результаты

Для фитинга использовалась целевая функция вида

$$F = \sum_{i=1}^N (R_{\text{теор}_i} - R_{\text{экс}_i})^2, \quad (7)$$

где  $N$  – число экспериментальных точек,  $R_{\text{теор}_i}$  и  $R_{\text{экс}_i}$  – теоретические и экспериментальные значения коэффициента отражения [6].

Для минимизации функции  $F$  использовался метод квадратичной интерполяции-экстраполяции [7].

Ниже приведены экспериментальные (сплошная кривая) и рассчитанные (штриховая кривая) контуры полосы экситонного отражения GaN и CuInSe<sub>2</sub>, а также параметры, полученные из фитинга. Для GaN применялась двухосцилляторная модель (рис. 2), а для CuInSe<sub>2</sub> – одноосцилляторная модель (рис. 3 и 4). Оцененные параметры приведены в таблицах 1 и 2.

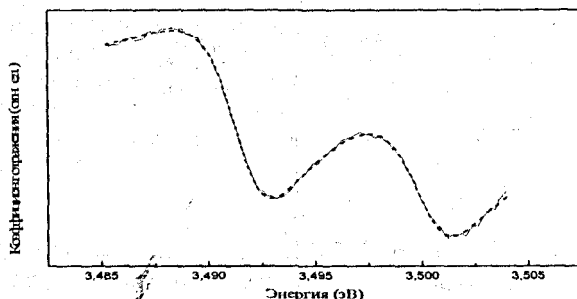


Рисунок 2 – Экспериментальный (сплошная линия) и рассчитанный (штриховая) контуры полосы экситонного отражения GaN при  $T = 8$  К для А- и В-экситонов

Таблица 1. Параметры, определенные из сравнения расчетных и измеренных спектров отражения в области свободных А- и В-экситонов GaN при  $T = 8$  К

Резонансные энергии	$E_A = 3.4908$ eV	$E_B = 3.4996$ eV
Параметры затухания	$\Gamma_A = 4.44$ meV	$\Gamma_B = 4.66$ meV
Толщина мертвого слоя	$d = 7.83$ nm	
Поляризуемости	$4\pi\alpha_A = 0.0041$	$4\pi\alpha_B = 0.0026$

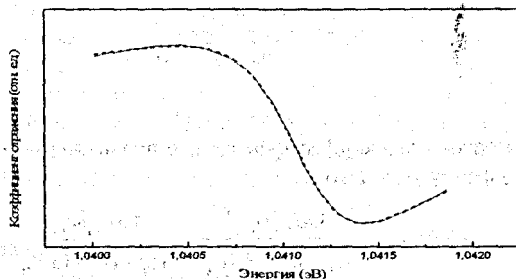


Рисунок 3 – Экспериментальный (сплошная линия) и рассчитанный (штриховая) контуры полосы экситонного отражения CuInSe<sub>2</sub> при  $T = 4.2$  К для А-экситона

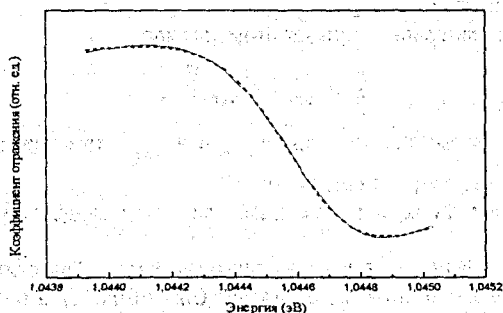


Рисунок 4 – Экспериментальный (сплошная линия) и рассчитанный (штриховая) контуры полосы экситонного отражения CuInSe<sub>2</sub> при  $T = 4.2$  К для В-экситона

Таблица 2 – Параметры, определенные из сравнения расчетных и измеренных спектров отражения в области свободных А- и В-экситонов CuInSe<sub>2</sub> при T = 4.2 К

	А-экситон	В-экситон
Резонансная энергия	$E = 1.04104 \text{ eV}$	$E = 1.04455 \text{ eV}$
Параметр затухания	$\Gamma = 0.91 \text{ meV}$	$\Gamma = 0.74 \text{ meV}$
Толщина мертвого слоя	$d = 7.83 \text{ nm}$	$d = 8.46 \text{ nm}$
Поляризуемость	$4\pi\alpha = 0.0033$	$4\pi\alpha = 0.0027$

### Заключение

В настоящей работе проанализированы спектры отражения нанокристаллов GaN и CuInSe<sub>2</sub> с помощью одно- и двухосцилляторной моделей с учетом "мертвого" слоя. Из сравнения экспериментальных и расчетных контуров спектров отражения определены значения энергии экситонного резонанса, параметра затухания, толщины "мертвого" слоя и поляризуемости.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – Москва, 1970.
2. Hopfield, J.J.; Thomas, D. Theoretical and Experimental Effects of Spatial Dispersion on the optical Properties of Crystals // Phys. Rev., 32, 1963. – S. 563-572.
3. Экситоны / Под ред. Э.И. Рашба. – Москва, 1985.
4. Киселев, В.А. Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников / В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко. – Ленинград, 1987.
5. Ракович, Ю.П. Экситонное отражение монокристаллов ZnSe с учетом влияния поверхностного электрического поля // ЖПС. 1999. – Т. 66. – № 3.
6. Rakovich, Yu. Computer modeling the Excitonic Reflection and Photoluminescence Spectra of GaN Epitaxial Layers. International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence / Yu. Rakovich, N.P. Tarasjuk, A.A. Gladyschuk, E.V. Lucenko, G.P. Yablonskii, M. Heuken, K. Heime. – Brest, 1999. – P. 204-209.
7. Боглаев, Ю.П. Вычислительная математика и программирование. – Москва, 1990.

УДК 535.337

*Ивенкова О.А.*

*Научный руководитель: ст. преподаватель Тарасюк Н.П.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСИТОННЫХ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

### Введение

Широкимасштабные исследования оптических спектров экситонов в полупроводниковых кристаллах вызваны в первую очередь потребностями бурно развивавшейся опто- и квантовой электроники.

Для анализа спектров в области экситонного резонанса наибольшее распространение получил метод подгонки вычисляемых по формулам Френеля кривых экситонного отражения к экспериментальным спектрам [1]. Далее по определенным из спектров отражения значениям резонансной энергии  $E_0$ , параметра затухания  $\Gamma$ , поляризуемости  $4\pi\alpha$ , толщины "мертвого" слоя  $d$  анализируются спектры фотолюминесценции и определяются коэффициент диффузии  $D_{ex}$  и время жизни экситонов  $T_{ex}$ .

Далее рассмотрим расчет экситонных спектров фотолюминесценции CuInSe<sub>2</sub> и GaN.