

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 535.232.61 : 621.383.522 : 543.423.1

**ИЗМЕРЕНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ  
В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 180–800 нм**

**В. А. Лабусов<sup>1,2</sup>, Д. О. Селюнин<sup>1,2</sup>, И. А. Зарубин<sup>1,2</sup>, Р. Г. Галлямов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>2</sup>*ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск*

*E-mail: labusov@vmk.ru*

Создана автоматизированная установка для измерения квантовой эффективности многоэлементных фотодетекторов, применяемых в атомно-эмиссионном спектральном анализе. Приведены результаты измерений квантовой эффективности линеек фотодиодов типа БЛПП-369 с разными легирующими элементами и покровными слоями, а также линеек приборов с зарядовой связью (ПЗС) Sony ILX-526A. Показано, что квантовая эффективность линеек фотодиодов в области 180–360 нм составляет 0,3–0,5, что в 2–5 раз выше, чем у линеек ПЗС ILX-526A с люминофором. Разброс значений квантовой эффективности фотодиодов одной линейки БЛПП-369 составляет не более 10 %, для линеек из разных партий он достигает 30 %.

**Введение.** В настоящее время для измерения интенсивности спектральных линий широко применяются многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров (анализаторы МАЭС), созданные на основе многокристальныхборок линеек фотодиодов [1–3]. Производятся плоские, вогнутые и многострочные сборки с различным количеством линеек для замены фотопластинок и фотоэлектронных умножителей в существующих спектральных приборах типов МФС, ДФС, ИСП, СТЭ и т. д. При этом базовой является линейка БЛПП-369 с количеством фотодиодов 2580, имеющих шаг размещения 12,5 мкм, высоту 1 мм, динамический диапазон  $10^4$  и спектральную чувствительность в диапазоне 160–1100 нм. Схема такой линейки показана на рис. 1, а. Генерированные фотодиодами заряды накапливаются в закрытых от излучения интеграторах (МОП-емкостях), не изменяя напряже-

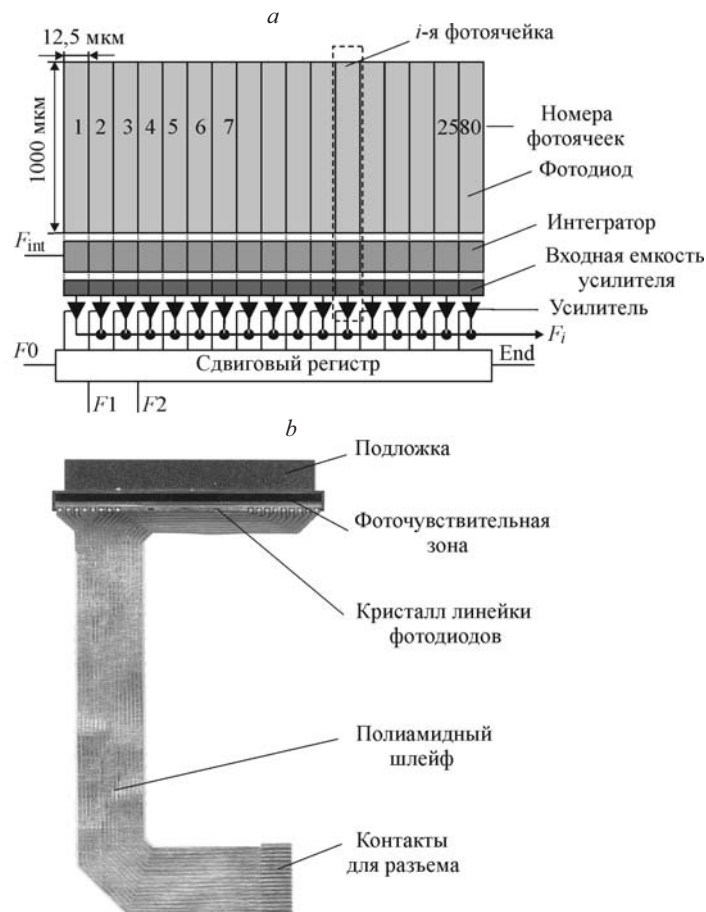


Рис. 1. Линейка фотодиодов типа БЛПП-369: структурная схема (а) и внешний вид кристалла с полиамидным шлейфом (б)

ния смещения фотодиодов. После окончания времени экспозиции заряды одновременно переносятся на входные емкости усилителей и начинается новый цикл их накопления в интеграторах. Сигналы усилителей с помощью коммутатора последовательно передаются на выход линейки фотодиодов. Линейка выполнена в виде кремниевого кристалла длиной 33 мм (рис. 1, б). Для ее разъемного соединения с электронной платой используется гибкий полиамидный шлейф.

Одним из важнейших параметров линеек фотодиодов, кардинально влияющим на пределы обнаружения элементов таблицы Менделеева в атомно-эмиссионном спектральном анализе, является квантовая эффективность (КЭ), равная отношению числа зарегистрированных фотоэлектронов к числу падающих на фотодиод фотонов. Поэтому при создании анализаторов МАЭС следует иметь информацию о значениях и разбросе КЭ фотодиодов линеек во всем рабочем диапазоне длин волн (160–1100 нм). Понятно также, что совершенствование характеристик линеек фотодиодов путем изменения

топологии и технологии их изготовления должно базироваться на знании всех основных характеристик таких элементов, в том числе КЭ.

Установки для измерения КЭ фотодетекторов имеются во Всероссийском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ, Москва) и в других организациях. Эти установки ориентированы в основном на измерение КЭ одиночных фотодетекторов. Спецификой линеек фотодиодов является то, что они содержат несколько тысяч фотоячеек, размещенных на длине в несколько десятков миллиметров, и работают в режиме накопления фотогенерированного заряда. Ежегодно для производства анализаторов МАЭС выпускаются десятки тысяч линеек фотодиодов. Поэтому необходимо знать разброс значений КЭ не только между фотодиодами одной линейки, но и между различными линейками фотодиодов. Даже при проведении выборочного контроля измерительная установка должна обеспечивать измерение КЭ во всем рабочем спектральном диапазоне за несколько минут.

Цель предлагаемой работы – информировать специалистов о создании автоматизированной установки для измерения квантовой эффективности многоэлементных фотодетекторов в спектральном диапазоне 180–800 нм, а также о результатах измерения квантовой эффективности линеек фотодиодов БЛПП-369 и линеек приборов с зарядовой связью (ПЗС) Sony ILX-526A (для сравнения), наиболее часто применяемых в атомно-эмиссионном спектральном анализе. Установка позволяет получить значения и разброс КЭ фотоячеек внутри произвольно выбранного образца линейки БЛПП-369, нескольких образцов таких линеек, изготовленных на одной кремниевой пластине или на разных пластинах, а также образцов линеек из разных партий и разных технологических маршрутов.

**Методика измерения КЭ фотодетектора** основана на измерении его выходного сигнала при регистрации монохроматического излучения известной мощности. Установка для измерения КЭ фотодетекторов в широком спектральном диапазоне включает широкополосный источник излучения и переключаемый монохроматор, выделяющий излучение нужной длины волны. При этом в ее состав входит калиброванный источник излучения или калиброванный фотодиод (КФ) с известной КЭ для измерения мощности монохроматического излучения, подаваемого на вход исследуемого фотодетектора. Очевидно, что применение КФ предпочтительнее, так как в этом случае результат измерения КЭ в меньшей степени зависит от характеристик монохроматора. Поэтому реализованный нами способ определения КЭ фотодиодов линейки основан на сравнении выходных сигналов ее фотоячеек с выходным сигналом КФ с известной КЭ. При этом оба детектора освещаются одинаковым монохроматическим излучением поочередно.

Выходной ток калиброванного фотодиода преобразуется операционным усилителем в напряжение  $U_k$ , значение которого после аналого-цифрового преобразования вводится в компьютер. Фотоячейка линейки фотодиодов содержит  $p-n$ -переход (фотодиод) и входную емкость усилителя ячейки  $C$ , включенные параллельно и соединенные с одной стороны с «землей», а с другой – с ключом, коммутирующим их с общей шиной с напряжением  $U_d$ . При замыкании ключа емкость  $C$  заряжается до напряжения  $U_d$ , после чего ключ размыкается. Под действием света через  $p-n$ -переход протекает ток, пропорциональный интенсивности излучения. Емкость  $C$  разряжается. Спустя время экспозиции  $t$  напряжение  $U$  на этой емкости после усиления и аналого-цифрового преобразования вводится в компьютер.

КЭ фотодиодов линейки определяется по формуле

$$\eta(\lambda) = k \frac{\Delta U}{U_k} \eta_k(\lambda),$$

где  $\eta(\lambda)$  – КЭ фотодиода исследуемой линейки;  $\Delta U = U_d - U$  – изменение напряжения на емкости  $C$ ;  $\eta_k$  – КЭ калиброванного фотодиода;  $k = \frac{CRS_k}{tS}$

( $R$  – сопротивление обратной связи операционного усилителя,  $S_k$  – площадь фоточувствительной области КФ,  $S$  – площадь фоточувствительной области линейки фотодиодов). Необходимо отметить, что из-за недостаточной точности определения значений емкости  $C$ , а также наличия разброса значений этой емкости у фотоячеек одной линейки и у различных линеек получить абсолютные значения КЭ фотодиодов линеек в данной работе не удалось. Предполагалось, что максимальные значения КЭ кремниевых фотодиодов в области 400–600 нм одинаковы и равны максимальному значению КЭ калиброванного фотодиода (0,65), что дало возможность подгонки полученных зависимостей КЭ от длины волны различных линеек фотодиодов под это условие путем подбора значений емкости  $C$ . Однако принятое предположение требует дополнительного изучения. В частности, на кремниевой пластине с линейками фотодиодов можно изготовить отдельные фотодиоды, идентичные фотодиодам линеек. Это позволит измерить абсолютные значения их КЭ, а также получить более точные значения емкости  $C$  для линеек фотодиодов.

Зная КЭ фотодиодов линейки, можно определить ее спектральную чувствительность по формуле

$$S(\lambda) = \frac{q_e |\lambda|}{hc} \eta(\lambda),$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света, а  $q_e$  – заряд электрона.

**Установка.** Схема измерительной установки показана на рис. 2. Осветительная система состоит из двух источников: лампы ДДС-30 для коротковолновой области спектра (180–470 нм) и галогенной лампы с вольфрамовой нитью накала для длинноволновой области (400–800 нм). С целью снижения интенсивности рассеянного излучения (особенно в области  $\lambda < 250$  нм) использовались два призматических монохроматора. При этом выходная щель первого монохроматора являлась входной для второго. В качестве двойного монохроматора применялся монохроматор CARY-16. Он наполнялся очищенным азотом для исключения поглощения излучения воздухом в области 180–

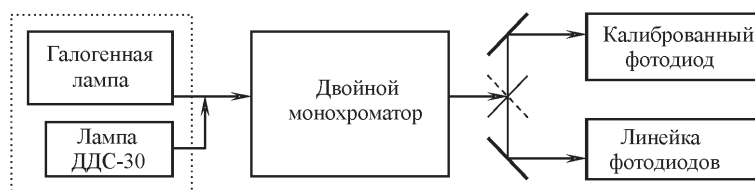


Рис. 2. Схема установки для измерения КЭ линейки фотодиодов

200 нм. КФ AXUV-100G прокалиброван в Национальном институте стандартизации и технологии США. В установке использованы шаговые приводы для изменения длины волны и переключения монохроматического излучения между КФ и линейкой фотодиодов. При этом монохроматическое излучение освещало не всю линейку (2580 фотодиодов), а лишь 80–160 фотодиодов. Для определения разброса КЭ фотодиодов, расположенных на одной линейке, КЭ измерялась в трех областях: в начале линейки (в области 200-го фотодиода), в середине (в области 1200-го фотодиода) и в конце (в области 2200-го фотодиода). В других случаях измерение КЭ проводилось в центральной части линейки (в области 1200-го фотодиода). Выходные сигналы КФ и фотодиодов линеек преобразовывались в цифровую форму и вводились в компьютер двумя блоками электронной регистрации анализаторов МАЭС с 16-разрядными аналого-цифровыми преобразователями. Управление процессом измерения, обработка сигналов, получаемых с фотодетекторов, расчет КЭ, визуализация и хранение данных осуществлялись с помощью специально разработанной компьютерной программы.

Важным является вопрос оптимизации параметров измерительной установки для сокращения времени получения значений КЭ во всем исследуемом спектральном диапазоне с наименьшей ошибкой измерения. Для обеспечения оптимального режима измерений необходимо выбрать ширину щелей монохроматора, шаг изменения длины волны, а также определить комбинацию светофильтров, снижающую изменение интенсивности излучения на выходе монохроматора в исследуемом спектральном диапазоне.

Выбор ширины щелей монохроматора осложнялся сильной нелинейностью его дисперсии. Ширина спектрального интервала на выходе монохроматора измерялась с помощью спектрофотометра «Колибри» [4]. В результате для коротковолновой области спектра ширина щелей составила 0,3 мм, а для длинноволновой – 0,04 мм. При таких размерах щелей ширина спектрального интервала излучения на выходе монохроматора изменялась от 1 до 7 нм, что приблизительно на порядок меньше, чем характерный размер изменений КЭ исследуемых линеек, таких как период квазипериодических колебаний КЭ (см. далее).

При выборе шага изменения длины волны учитывалось, что, с одной стороны, он должен быть достаточно большим, чтобы уменьшить время измерения, с другой – существенно меньше характерного размера изменений КЭ. Оптимальным оказался шаг 3 нм.

Интенсивность излучения лампы с вольфрамовой нитью накала значительно увеличивается при изменении длины волны с 400 до 700 нм, что приводит к насыщению выходного сигнала КФ. Для уменьшения зависимости интенсивности излучения от длины волны использовалась комбинация светофильтров из СЗС7 и СС1.

В результате оптимизации параметров измерительной установки время измерения КЭ фотодиодов одной линейки составило 12 мин при относительном среднеквадратическом отклонении результатов измерения КЭ менее 2,5 %.

**Результаты измерения квантовой эффективности многоэлементных фотодетекторов.** С помощью созданной установки были получены экспериментальные значения КЭ в спектральном диапазоне 180–800 нм для линеек фотодиодов типа БЛПП-369, в том числе линеек с различными легирующими примесями и защитными пленками.

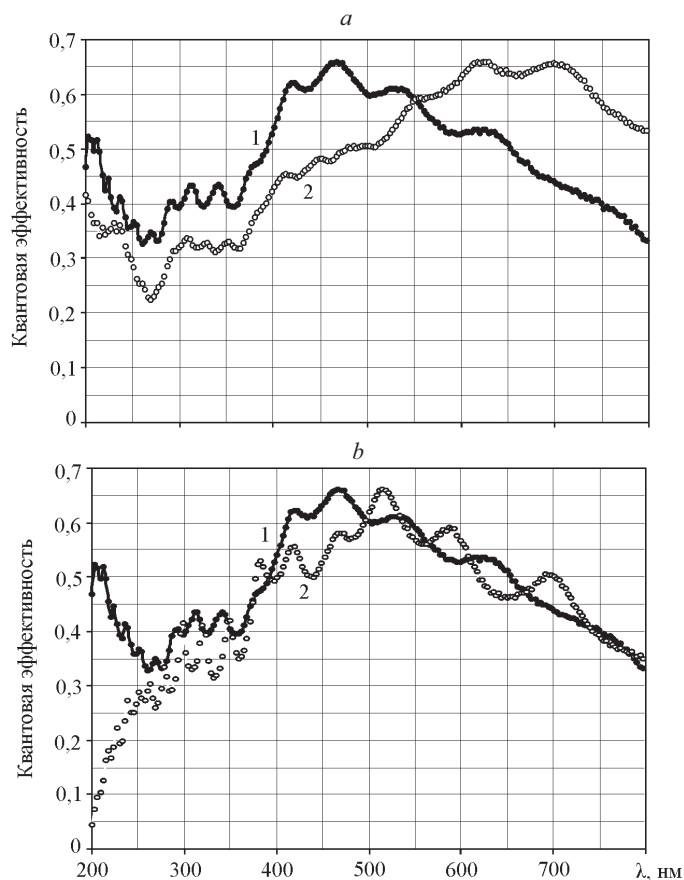


Рис. 3. Зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения: *a* – для линеек БЛПП-369 с разными легирующими элементами (кривая 1 – мышьяк, 2 – фосфор), *b* – для линеек с различными покровными пленками (кривая 1 – один слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,1 мкм, 2 – три слоя:  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,1 мкм,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,135 мкм,  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,5–1,0 мкм)

КЭ фотодиода зависит от физических параметров  $p$ – $n$ -перехода и покрывающих его слоев. Для примера на рис. 3, *a* представлены графики зависимости КЭ  $p$ – $n$ -переходов фотоячеек линеек БЛПП-369, полученных путем имплантации в кремний ионов мышьяка и ионов фосфора, от длины волны излучения ( $p$ – $n$ -переходы покрыты одним слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,1 мкм). В этом случае глубины залегания  $p$ – $n$ -переходов составляют 0,2 и 0,6 мкм соответственно. Значения этих глубин определяют положение максимума КЭ. Общее снижение КЭ в коротковолновой области 200–400 нм объясняется, в частности, повышенной дефектностью приповерхностного слоя промышленного кремния. В этом случае даже при залегании  $p$ – $n$ -перехода на уровне 0,2 мкм количество фотоносителей, достигающих этого перехода, не велико (из-за их малой длины диффузии). Из графиков следует, что в данной области длин волн фотоячейки, имплантированные ионами мышьяка, имеют более высокую (на 10–30 %) КЭ, чем те же линейки, имплантированные фосфором. Однако это преимущество дается ценой снижения КЭ фотодиодов в области

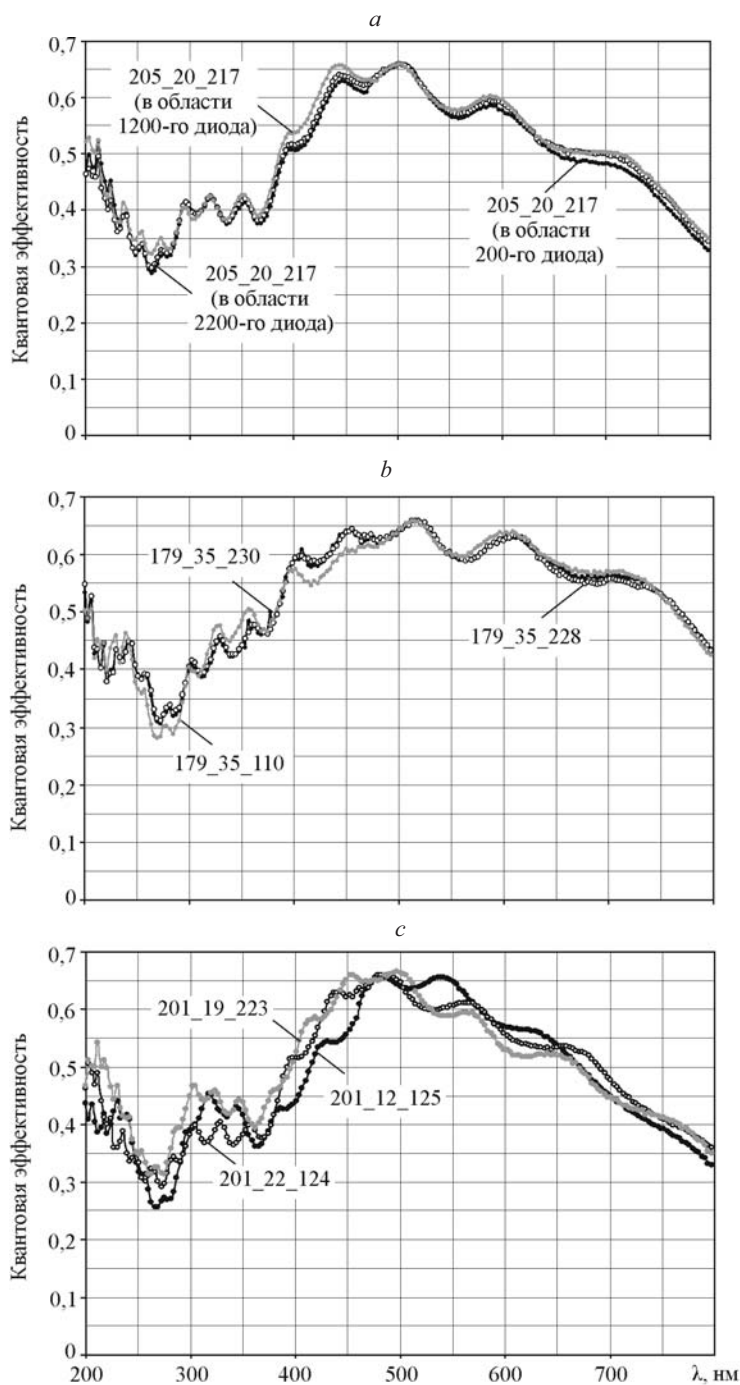


Рис. 4. Зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения линеек фотодиодов БЛПП-369: *a* – на трех различных участках одной линейки; *b* – для трех линеек, изготовленных на одной кремниевой пластине; *c* – для трех линеек, изготовленных на кремниевых пластинах одной партии, (окончание см. на стр. 34)



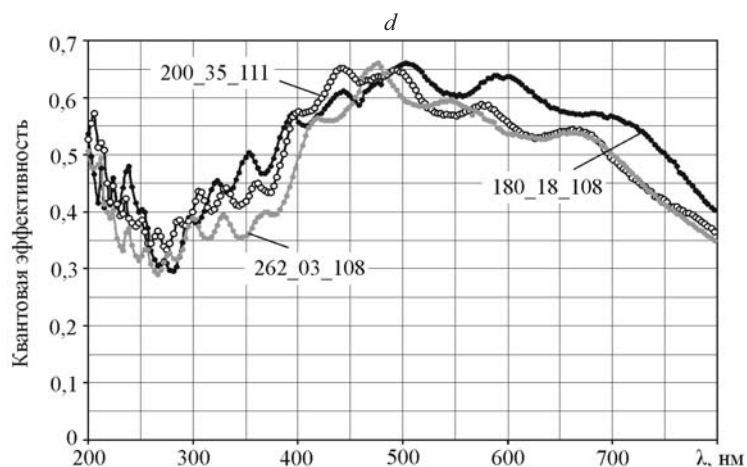


Рис. 4. Зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения линеек фотодиодов БЛПП-369 (начало см. на стр. 33): *d* – для трех линеек, изготовленных на разных кремниевых пластинах разных партий

длин волн 550–800 нм, существенно менее интересной для атомно-эмиссионного спектрального анализа.

Слои, покрывающие фоточувствительный *p-n*-переход детектора, служат для его защиты от негативного воздействия окружающей среды как во время изготовления, так и в процессе дальнейшей эксплуатации. Кроме того, защитные слои должны обладать максимальным коэффициентом пропускания в рабочем спектральном диапазоне. В качестве примера на рис. 3, *b* приведены графики зависимости КЭ от длины волны излучения для однослойной пленки двуокиси кремния (кривая 1) и трехслойной пленки (кривая 2), содержащей слой нитрида кремния (*p-n*-переходы получены путем имплантации ионов мышьяка). Оба эти покрытия обеспечивают хорошую защиту от окружающей среды, но оказывают разное влияние на КЭ фотодиодов. Можно заметить, что гораздо лучшие результаты по КЭ наблюдаются у линеек со слоем двуокиси кремния. КЭ фотодиодов с нитридными защитными слоями в области длин волн, меньших 380 нм, существенно снижается, что объясняется сильным поглощением излучения рассматриваемого интервала длин волн в нитриде.

Для демонстрации степени разброса КЭ на рис. 4 представлены графики ее зависимости от длины волны излучения для трех разных участков (в областях 200-, 1200- и 2200-го фотодиодов) произвольно выбранного образца линейки (*a*), а также для одного участка (в области 1200-го фотодиода) на различных образцах линеек, изготовленных на одной кремниевой пластине, (*b*), на разных пластинах одной партии (*c*) и на пластинах разных партий (*d*) (легирующая примесь – мышьяк, покровная пленка – слой SiO<sub>2</sub> толщиной 0,1 мкм). (Номер линейки 205\_20\_217: номер партии 205, номер пластины 20 и координаты кристалла линейки на пластине 217.) Квазипериодические колебания КЭ, наблюдаемые на рис. 4, *a–d*, связаны с интерференционными эффектами, возникающими при переотражении излучения в покровной пленке. Сохранение фазы колебаний на всех графиках рис. 4, *a, b* свидетельствует о постоянстве толщины покровной пленки не только по всей длине



фоточувствительной области одной линейки, но и по всей кремниевой пластине. Разброс КЭ фотодиодов линеек, изготовленных на одной кремниевой пластине, не превышает 10%. Обнаружено, что разброс значений КЭ разных фотодиодов возрастает с увеличением расстояния между их геометрическим положением на пластине, что свидетельствует о плавности изменения этой характеристики по поверхности пластин. На рис. 4, с также наблюдается хорошее соответствие характеристик линеек, изготовленных на разных пластинах одной партии, хотя разброс их КЭ увеличивается и на отдельных спектральных участках превышает 10%. На рис. 4, d можно видеть, что разброс КЭ линеек разных партий проявляется наибольшим образом и на отдельных участках спектра достигает 30%.

Как отмечалось выше, квазипериодические колебания КЭ связаны с интерференционными эффектами, возникающими при переотражении излучения в покровной пленке. Коэффициент пропускания однослойной покрывающей пленки описывается формулой [5]

$$T = \frac{n_2}{n_0} \frac{(1 + r_1)^2 (1 + r_2)^2}{[1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta]},$$

где

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}; \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

( $n_0 = 1$  – показатель преломления воздуха,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления покровной пленки и кремния соответственно);

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1$$

( $d_1$  – толщина покровного слоя). При  $2\delta = \pi(2l + 1)$ ,  $l = 1, 3, 5, \dots$ , коэффициент пропускания принимает наибольшие значения, соответствующие максимумам КЭ. Зная длины волн ( $\lambda_l$  и  $\lambda_{l+1}$ ), при которых КЭ принимает максимальные значения, можно определить толщину покровного слоя по формуле

$$d_1 = \frac{\lambda_l \lambda_{l+1}}{2n_1 (\lambda_{l+1} - \lambda_l)}.$$

Путем расчета получена толщина слоя, ответственного за наблюдаемый интерференционный эффект, равная 1,3 мкм. Это на порядок больше толщины пленки  $\text{SiO}_2$  (0,1 мкм), покрывающей фотодиоды линейки.

Рассмотрим теперь фрагмент топологии линейки фотодиодов БЛПП-369 в разрезе (рис. 5). С целью уменьшения взаимного влияния фотодиоды, сформированные на поверхности кремния, разделены изолирующими областями из  $\text{SiO}_2$ , которые называются локусами. Однако локусы пропускают излучение, в результате чего фотогенерированные носители, образованные под ними в кремнии, достигают соседних  $p$ - $n$ -переходов за счет диффузии и вносят вклад в выходной сигнал линейки. Значения толщины локусов с хорошей точностью совпадают со значениями, рассчитанными по периоду колебаний

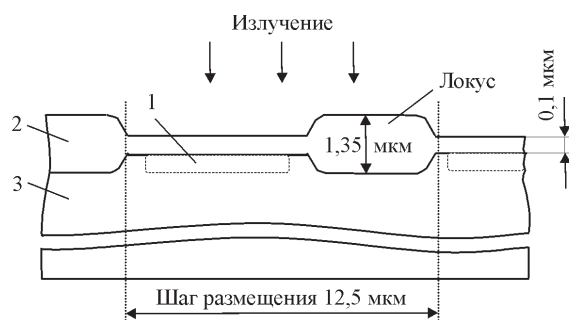


Рис. 5. Поперечный разрез фотодиодной ячейки линейки фотодиодов БЛПП-369 (1 – легирующая примесь, 2 – двуокись кремния, 3 – кремниевая подложка)

КЭ. Это означает, что именно зависимость коэффициента пропускания области локуса от длины волны приводит к колебаниям значений КЭ линеек БЛПП-369. Графики КЭ линеек БЛПП-369 и опытной линейки БЛПП-2Б, у которой отсутствуют локусы между фотодиодами и, как следствие, отсутствуют колебания значений КЭ, приведены на рис. 6. Таким образом, помимо измерения КЭ линеек фотодиодов установка позволяет определять толщину области локусов.

С помощью созданной установки можно измерять значения КЭ других многоэлементных фотодетекторов. Так, на рис. 7 представлены графики зависимости КЭ от длины волны для фотоячеек линейки ПЗС Sony ILX-526A в заводском исполнении и с люминофорным покрытием. Здесь же для сравнения показан график для линейки БЛПП-369. Из рис. 7 следует, что нанесение на линейку ПЗС люминофора расширяет диапазон ее спектральной чувствительности в коротковолновую область. Однако в данной области КЭ линеек ПЗС (даже покрытых люминофором) в 2–5 раз меньше КЭ линеек фотодиодов БЛПП-369. Уменьшение амплитуды квазипериодических колебаний в линейках ПЗС с люминофором связано с уменьшением коэффициента от-

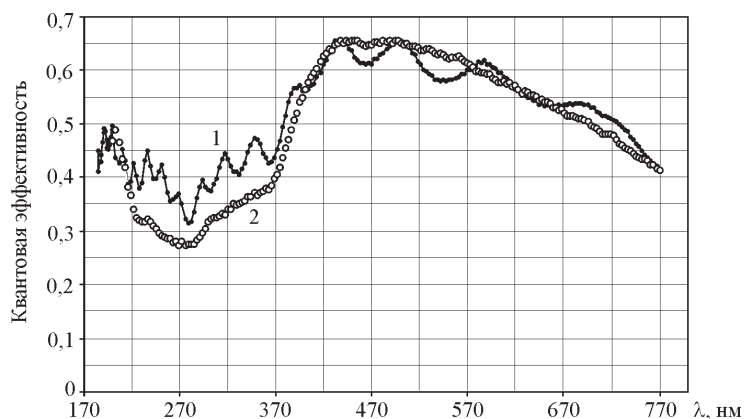


Рис. 6. Зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения для линеек фотодиодов (кривая 1 – БЛПП-369, 2 – БЛПП-2Б)

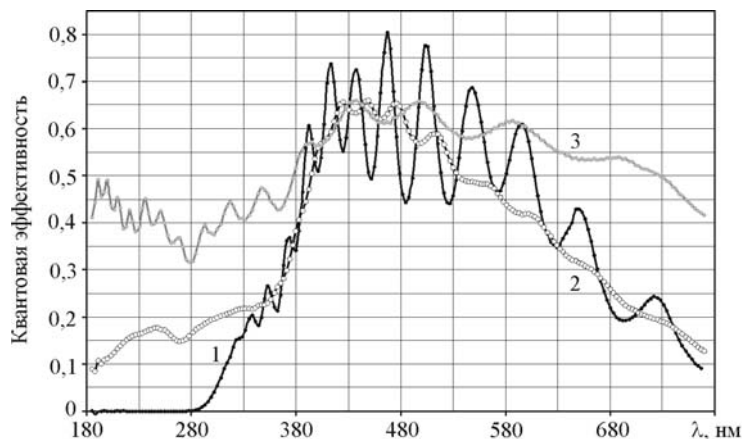


Рис. 7. Зависимости квантовой эффективности от длины волны излучения для ПЗС-линеек ILX-526A (кривая 1 – без люминофора, 2 – с люминофором) и линейки фотодиодов БЛПП-369 (кривая 3)

ражения от поверхности электродов фотоячеек. Последний определяется разницей показателей преломления сред, разделяемых этой поверхностью: без люминофора – «воздух–электрод», с люминофором – «люминофор–электрод». Существенное уменьшение амплитуды колебаний свидетельствует о близости значений показателей преломления люминофора и электродов.

**Заключение.** Таким образом, разработанная автоматизированная установка позволяет проводить измерения квантовой эффективности многоэлементных фотодетекторов в диапазоне 180–800 нм. Компьютерная программа обеспечивает управление установкой, обработку сигналов, получаемых с фотодетекторов, вычисление их квантовой эффективности, визуализацию и хранение данных. Время измерения квантовой эффективности одной линейки фотодиодов во всем рабочем спектральном диапазоне составляет 12 мин. Экспериментально подтверждено, что путем легирования поверхности полупроводника мышьяком и использования защитных пленок из двуокиси кремния квантовая эффективность линеек фотодиодов существенно повышается (в сравнении с легированием фосфором и использованием защитной пленки из нитрида кремния) в области 180–400 нм и достигает значений 0,3–0,5 и более. Разброс значений квантовой эффективности фотодиодов одной линейки БЛПП-369 составляет не более 10 %, в то время как для линеек из разных партий он достигает 30 %. Квазипериодические колебания квантовой эффективности линеек БЛПП-369 определяются зависимостью коэффициента пропускания локусов, изолирующих фотодиоды, от длины волны. Установка пригодна для измерения квантовой эффективности и других фотодетекторов. Так, линейки ПЗС Sony ILX-526A без люминофорного покрытия не чувствуют излучение с длинами волн меньше 360 нм. Нанесение люминофора расширяет чувствительность в коротковолновую область, однако в спектральном диапазоне 180–360 нм их квантовая эффективность в 2–5 раз меньше квантовой эффективности линеек фотодиодов БЛПП-369. Установка используется для оперативного контроля квантовой эффективности производимых линеек фотодиодов БЛПП-369.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лабусов В. А., Бехтерев А. В.** Линейки фотодиодов – базовые элементы многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. 2007. **73**. С. 7.
2. **Лабусов В. А.** Многокристальные сборки многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Там же. С. 13.
3. **Лабусов В. А., Попов В. И., Путьмаков А. Н. и др.** Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров // Аналитика и контроль. 2005. **9**, № 2. С. 110.
4. **Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Саушкин М. С. и др.** Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // Заводская лаборатория. 2007. **73**. С. 35.
5. **Полупроводниковые** формирователи сигналов изображения /Под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уайта. М.: Мир, 1979.

*Поступила в редакцию 5 октября 2007 г.*

---