



УДК 53.082.52

Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Анализ спектральных линий с различной интенсивностью при диагностике технологических процессов

*Рассмотрены ограничения, накладываемые на время накопления заряда в фотоприемниках с зарядовой связью, связанные с процессами генерации зарядов в полупроводниковой структуре. Определен диапазон времени накопления заряда, в котором для исследованного фотоприемника наблюдается линейность светосигнальной характеристики. Показаны особенности эффекта блюминга при перенасыщении сигнала для исследованного типа фотоприемника с зарядовой связью. Продемонстрирована возможность одновременного анализа линий малой и высокой интенсивности при многократном суммировании спектров излучения, полученных при небольшом времени накопления заряда.*

### Спектральная линия, оптический спектрометр, фотоприемник, интенсивность излучения, блюминг

Применение оптических спектрометров для контроля и диагностики технологических процессов [1], [2] дает широкие возможности для исследования свойств материалов, а также управления свойствами и качеством получаемых в результате ионно-плазменных операций пленок и покрытий.

Современное спектральное оборудование в большинстве своем построено на основе фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС), являющихся одними из наиболее чувствительных приемников излучения [3]. Типичный рабочий диапазон длин волн такого приемника составляет 200...1000 нм.

Выбор ФПЗС при создании оптической части спектрометра обусловлен не только его высокой чувствительностью, такой фотоприемник имеет ряд других достоинств. Заряд, возникающий в элементе секции накопления ФПЗС, пропорционален интенсивности регистрируемого излучения, а также интервалу времени, в течение которого сток заряда в потенциальную яму перекрыт с помощью затвора переноса. Эффект взаимозаменяемости интенсивности излучения и времени накопления заряда создает возможность управле-

ния чувствительностью спектрального прибора с помощью его программного обеспечения (ПО). Подобный способ позволяет снимать сигнал от источников с интенсивностями излучения, отличающимися в десятки и даже сотни раз [4].

Необходимая продолжительность накопления заряда в ФПЗС связана с интенсивностью излучения в рассматриваемом спектральном диапазоне. Чем ниже ее уровень, тем продолжительнее должен быть период накопления заряда для получения приемлемой амплитуды сигнала на выходе фотоприемника. Однако необходимо учесть, что генерация неосновных носителей заряда в полупроводнике может происходить не только за счет фотоэффекта, но также и в результате термической ионизации. Таким образом, для каждой полупроводниковой структуры при определенной температуре существует предел продолжительности накопления заряда и, соответственно, минимальная (пороговая) энергия излучения, которую возможно зарегистрировать на фоне генерации тепловых электронов и шумов различной природы [5].

Количество тепловых электронов  $n$ , образующихся в ячейке ФПЗС за время  $t$ , можно записать в виде

$$n \approx (StT^2/q) \exp(-\Delta E/kT),$$

где  $S$  – площадь ячейки;  $T$  – температура кристалла ФПЗС;  $q$  – заряд электрона;  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  $k$  – постоянная Больцмана.

Темновой ток является результатом спонтанной генерации электронно-дырочных пар. Одним из наиболее эффективных способов уменьшения темнового тока, а также, соответственно, и теплового шума является охлаждение кристалла ФПЗС, что, в свою очередь, позволяет понизить пороговое значение энергии регистрируемого излучения. В устройствах, не требующих очень низких значений темнового тока, обычно применяется термоэлектрическое охлаждение с использованием элементов Пельтье [6].

Рассмотрим светосигнальную характеристику ФПЗС TCD1304 (3648 чувствительных элементов размером  $8 \times 200$  мкм каждый) производства фирмы «Toshiba», используемого в качестве приемника излучения во многих современных компактных спектрометрах, в частности в разработанном на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» спектрометрическом комплексе ISM3600 [6], [7].

Интерес представляет определение диапазона времени накопления заряда, в котором сохраняется линейность светосигнальной характеристики спектрального прибора. Время накопления заряда в ПО рассматриваемого спектрометра может программно устанавливаться в интервале 0.02...5000 мс. Нижний предел обусловлен необходимым минимальным временем накопления заряда, а верхний – увеличением темнового тока до уровня максимального сигнала.

На рис. 1 представлен результат проверки линейности светосигнальной характеристики ФПЗС ( $I$  – интенсивность излучения). Данные результаты получены при измерении спектра излучения источника фиксированной интенсивности – галогенной лампы накаливания, включенной в схему стабилизации по току, обеспечивающую колебания интенсивности излучения не более  $\pm 0.5\%$ . В данном случае темновой ток ФПЗС программно вычитается из полного сигнала. Темновой сигнал измеряется при автоматическом закрытии входной щели непрозрачной шторкой с помощью реле, управляемого ПО спектрометрического комплекса.

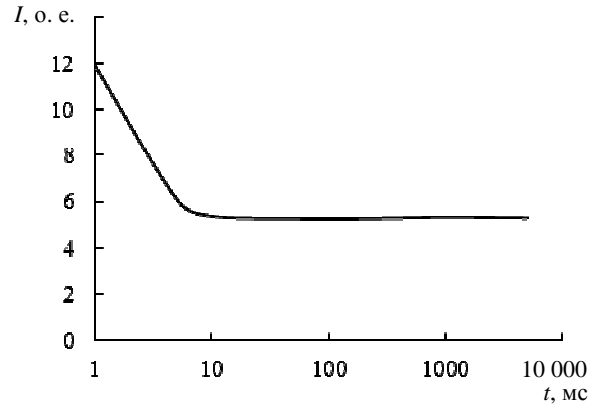


Рис. 1

Приведенный на рис. 1 график демонстрирует линейность характеристики спектрометра с ФПЗС в достаточно широком диапазоне изменения времени накопления – 10...5000 мс. Наблюдается многократное совмещение диапазонов измерения – уменьшение входного сигнала можно компенсировать пропорциональным увеличением времени накопления заряда в секции накопления. Однако в области малых значений времени накопления линейность светосигнальной характеристики ФПЗС нарушается. Данный факт может быть обусловлен как особенностями самого ФПЗС, так и влиянием цифровой схемы управления прибором [8]. Исходя из этого, можно рекомендовать проводить измерения спектров излучения при времени накопления заряда не менее 10 мс. Стоит отметить, что увеличение времени накопления приводит к уменьшению влияния пульсаций источника излучения, что улучшает качество получаемых картин спектрального распределения.

ФПЗС практически не имеют порога детектирования – оптическое излучение, обладающее даже очень слабой интенсивностью, все равно будет создавать электроны в ячейках секции накопления, хотя и в небольшом количестве. Однако емкость каждого пикселя для генерируемых зарядов неограничена. Если количество фотонов, воздействующих на ячейку в период накопления, достаточно велико, то число созданных зарядов может оказаться больше емкости пикселя. В этом случае сигнал достигает насыщения, а избыточный заряд начинает перетекать в соседние ячейки. Этот эффект называется блюмингом. Воздействие блюминга на выходной сигнал ФПЗС выражается в уширении интенсивных линий.

Возникновение эффекта блюминга проще всего продемонстрировать не на линейчатом спектре излучения плазмы, а на примере сплошного спек-

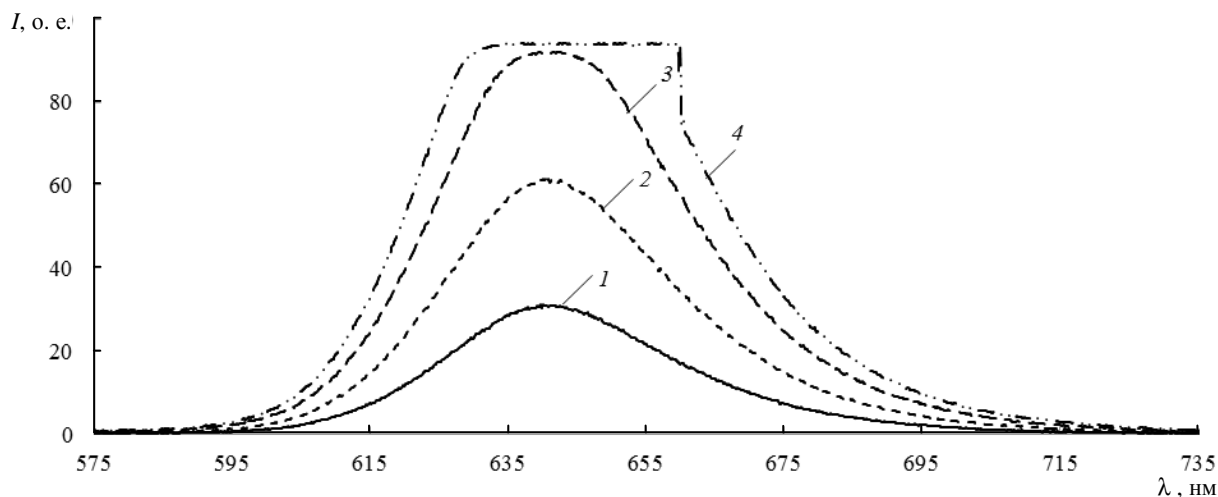


Рис. 2

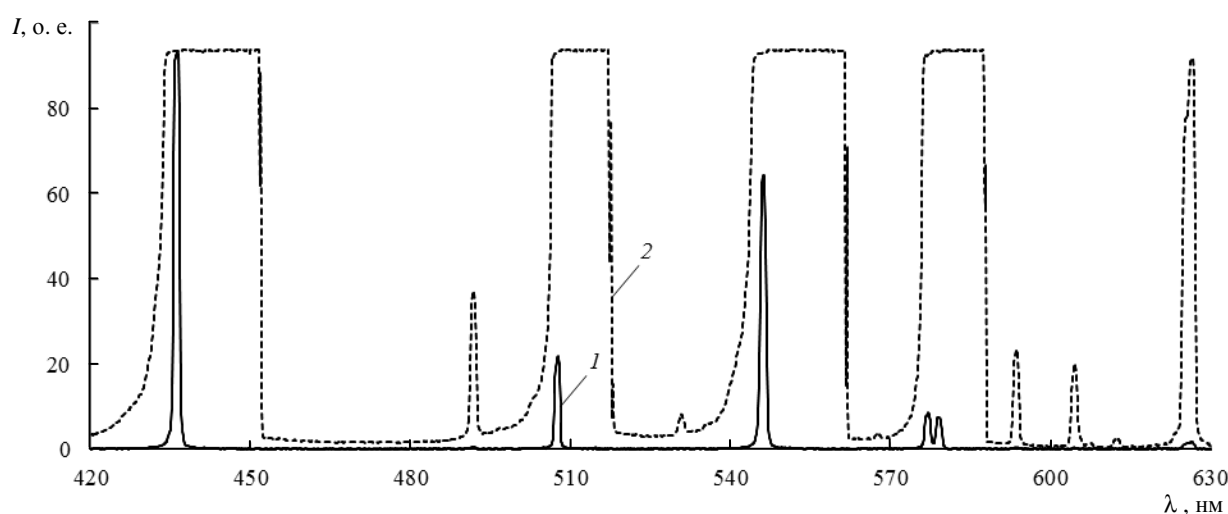


Рис. 3

тра излучения, например спектре светодиода (рис. 2, где  $\lambda$  – длина волны излучения).

Очевидно, что до определенного момента увеличение времени накопления заряда приводит к линейному возрастанию интенсивности сигнала (зависимости 1–3), в дальнейшем же (зависимость 4) проявляется эффект блюминга. Можно было ожидать симметричное уширение спектральной характеристики светодиода – «полочка» в области максимальной интенсивности и равномерное растекание избыточного заряда в соседние ячейки с обеих сторон линейки ФПЗС. Однако проявляется существенное искажение формы сигнала в области больших длин волн.

Данный эффект не описан производителем ФПЗС, и его природу без анализа внутренней структуры микросхемы доподлинно определить не представляется возможным. Можно предположить, что данное искажение происходит при переносе зарядовых пакетов – емкость ячеек секции переноса несколько меньше емкости пиксе-

лей, в этом случае не поместившийся в ячейки секции переноса заряд при транспортировке начинает перетекать в ближайшие по ходу движения ячейки.

Рассмотрим проявление эффекта блюминга на примере фрагмента линейчатого спектра ртутной лампы низкого давления (рис. 3, где 1 – спектр при времени накопления, обеспечивающем отсутствие блюминга; 2 – спектр с блюмингом). Из рисунка видно, что происходит значительное уширение спектральных линий, что приводит к существенным трудностям при определении длины волны соответствующей линии. Следует отметить, что в случае линейчатого спектра также наблюдается уширение спектральных линий в сторону больших длин волн, т. е. по направлению движения зарядовых пакетов при переносе. Использовать данный спектр для анализа состава газовой смеси практически не возможно ввиду слишком существенного изменения формы линий [9], [10]. В частности, блюминг приводит к «сли-

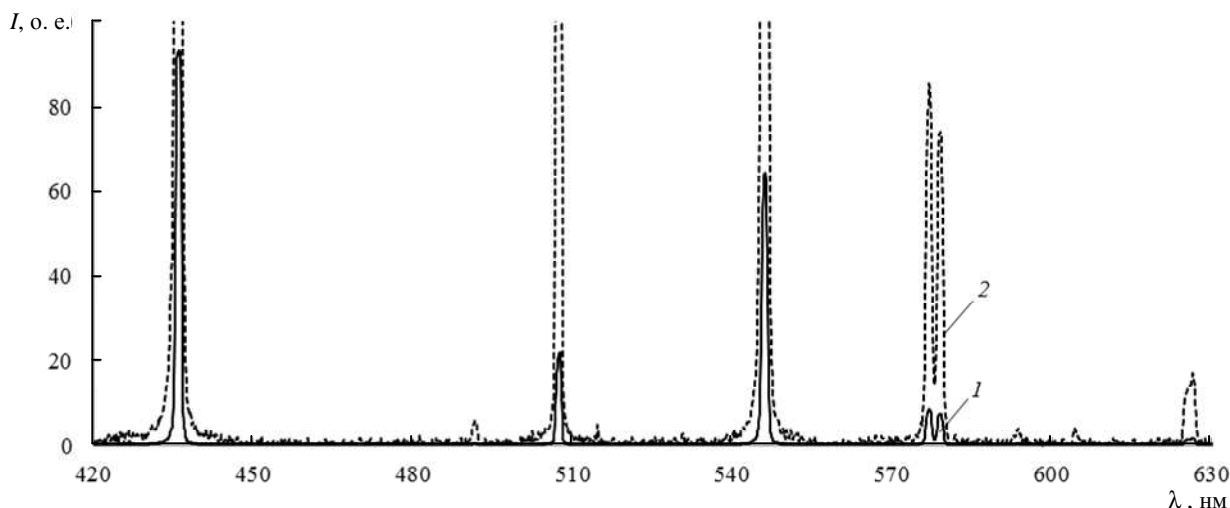


Рис. 4

панию» линий дублетов (например, дублета 577...579 нм) и триплетов в одну.

С другой стороны, значительное увеличение времени накопления заряда привело к возникновению в спектральной картине новых линий. Интенсивность отдельных спектральных линий зачастую крайне мала, и однократное считывание содержимого секции накопления не позволяет различить этот слабый сигнал на фоне общего шума ФПЗС. Используя многократное суммирование сигнала с последующим усреднением, удается «вытянуть» из спектра такие линии, которые невозможно было бы зарегистрировать с помощью иных фотоприемников из-за наличия у них пороговой чувствительности. На рис. 4 приведен фрагмент спектра излучения ртутной лампы, полученный при времени накопления 10 мс (1) и сумма десяти таких спектров (2). На зависимости 2, в частности, стали заметны слившиеся в одну спектральные линии 489 и 491.6 нм. Очевидно, что суммирование спектров, полученных при малом времени накопления, с одной стороны, дает возможность рассмотреть спектральные линии

слабой интенсивности, а с другой – избавиться от эффекта блюминга и не потерять информацию о линиях высокой интенсивности.

Основываясь на проведенных экспериментах, можно рекомендовать при использовании спектрального оборудования, построенного с применением ФПЗС TCD1304, осуществлять измерения при выходном сигнале прибора, изменяющемся в диапазоне 20...90 о. е. (за единицы измерения выходного сигнала приняты проценты от уровня максимального сигнала, снимаемого с ФПЗС, который соответствует ее насыщению). Выбор данного диапазона обусловливается тем, что при низких значениях уровня сигнала значительно возрастает погрешность аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав схемы преобразования прибора, к тому же сигнал становится соизмеримым с уровнем шума, что приводит к значительной неточности измерения. При значениях выходного сигнала более 90 о. е. проявляется эффект блюминга, приводящий к резкому уширению спектральных линий, что создает значительные трудности в определении их положения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю. А., Кострин Д. К., Лисенков А. А. Спектрометрический анализ состава плазменного потока вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 23, № 1. С. 164–166.
2. Кострин Д. К. Исследование возможности экспресс-контроля состава воды оптическим спектрометром при использовании разряда в жидкости // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 7. С. 15–19.
3. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.
4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.
5. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 8–13.
6. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.

7. Кострин Д. К., Ухов А. А. Повышение метрологических характеристик спектрометрического оборудования при диагностике ионно-плазменных процессов // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 34–38.

8. Ухов А. А., Кострин Д. К. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 8–12.

9. Кострин Д. К., Ухов А. А. Обнаружение и компенсация ложных спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 26–28.

10. Кострин Д. К. Автоматический поиск положения спектральных линий при анализе спектров излучения плазмы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 11–15.

D. K. Kostrin

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## THE ANALYSIS OF SPECTRAL LINES WITH DIFFERENT INTENSITY IN CASE OF DIAGNOSTICS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

*The restrictions superimposed for the period of charge accumulation in charge-coupled photo-sensor elements, connected to processes of generation of charges in semiconductor structure are considered. The range of times of charge accumulation in which for the considered photo-sensor element linearity of the light-signal characteristic is watched is defined. Features of effect of blooming in case of supersaturation of a signal for researched type of the charge-coupled photo-sensor element are shown. Possibility of the simultaneous analysis of lines of small and high intensity in case of repeated summing of the spectrums of radiation received in case of small time of charge accumulation is shown.*

**Spectral line, optic spectrometer, photo-sensor element, intensity of radiation, blooming**

УДК 621.383.72

Е. Г. Лобанова

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт „Электрон“»  
(Санкт-Петербург)

## Методы повышения чувствительности фоточувствительных приборов с переносом заряда с освещением со стороны подложки

*Рассмотрены основные методы сенсibilизации фоточувствительной поверхности фоточувствительных приборов с переносом заряда с освещением со стороны подложки. Подробно рассмотрены преимущества и недостатки каждого метода с учетом особенностей технологии производства фоточувствительных приборов с переносом заряда.*

**Фоточувствительный прибор с переносом заряда, сенсibilизация, хемосорбция, ионное легирование, лазерный отжиг, молекулярно-лучевая эпитаксия**

В настоящее время наиболее распространенными являются традиционные фоточувствительные приборы с переносом заряда (ФППЗ) с освещением со стороны электродов [1]–[6]. Однако в таких ФППЗ максимум квантовой эффективности в спектральном диапазоне от 0.2 до 1.06 мкм не превышает 50 % (на рис. 1 приведены характеристики ФППЗ производства: 1 – «Hamamatsu»; 2 – «e2v»; 3 – «Dalsa»), что связано в основном с поглощением

и отражением падающего излучения от поликремневых электродов. Избежать этих недостатков и увеличить квантовую эффективность приборов в ультрафиолетовой (УФ) части спектра удалось в ФППЗ, облучаемых со стороны подложки (см. рис. 2, где приведены характеристики ФППЗ производства: 1 – «Hamamatsu»; 2 – «e2v»; 3 – «Dalsa»; 4, 5 – ОАО «ЦНИИ „Электрон“»). Однако производство таких приборов требует