

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

решения ряда технологических задач, таких как процессы утонения приборной подложки, сенсibilизации фоточувствительной поверхности и нанесения антиотражающих покрытий.

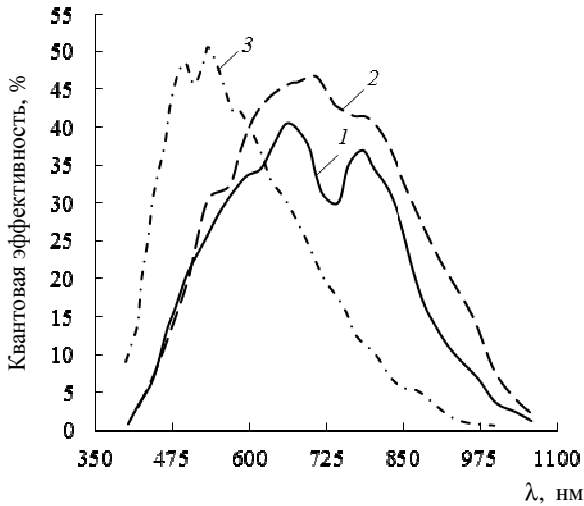


Рис. 1

Методы повышения чувствительности ФППЗ. Процесс сенсibilизации фоточувствительной поверхности является одним из наиболее важных. Основная проблема, которая решается в процессе повышения чувствительности ФППЗ, – наличие паразитной потенциальной ямы на обратной стороне подложки. После процесса утонения на поверхности подложки образуются:

- оборванные связи на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$;
- поверхностные состояния, обусловленные дефектами кристаллической решетки;

- поверхностные состояния, вызванные адсорбцией инородных атомов или молекул;
- тонкий (толщиной порядка $10\text{...}15 \text{ \AA}$) слой естественного оксида, имеющий встроенный фиксированный положительный заряд.

Все это приводит к тому, что сгенерированный в приповерхностном слое фотоэлектрон имеет высокую вероятность попасть в приповерхностную потенциальную яму и рекомбинировать. Особенно сильно процесс захвата сигнальных носителей проявляется в синей и УФ-областях спектра.

Механизм работы потенциальной ямы представлен на рис. 3 на сечении схематически изображенной структуры ФППЗ с наложением энергетической диаграммы (E – энергия частиц; X – координата; 1 – воздействующий свет; 2 – слой ионов вблизи поверхности; 3 – приповерхностная потенциальная яма, образующая мертвый слой; 4 – скрытый канал; 5 – электроды). Толщина мертвого слоя может достигать нескольких десятков нанометров, в зависимости от качества и чистоты поверхности, в то время как глубина проникновения фотонов с длиной волны $150\text{...}300 \text{ нм}$ не превышает 10 нм . Этот факт значительно ограничивает чувствительность приборов в УФ-области спектра. Так, на длине волны падающего света $\lambda = 280 \text{ нм}$ при толщине мертвого слоя 1 нм поглощается 20% потока, а при толщине 20 нм – 100% .

Все способы сенсibilизации можно разделить на две группы:

- 1) формирование подходящей внешней структуры на поверхности кремния;

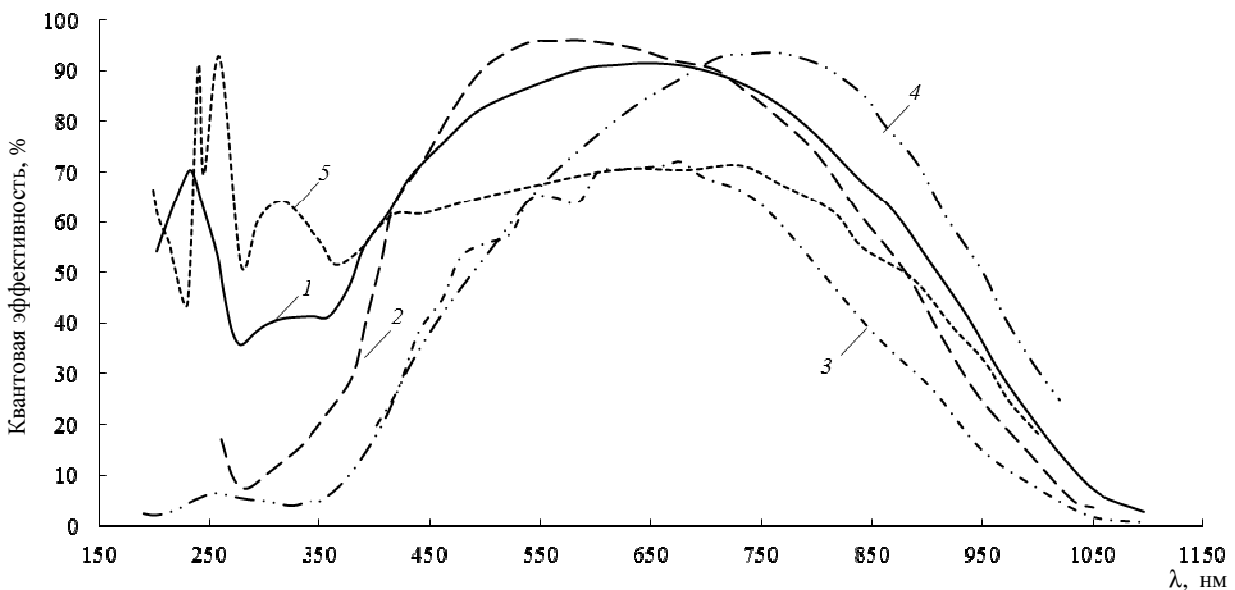


Рис. 2

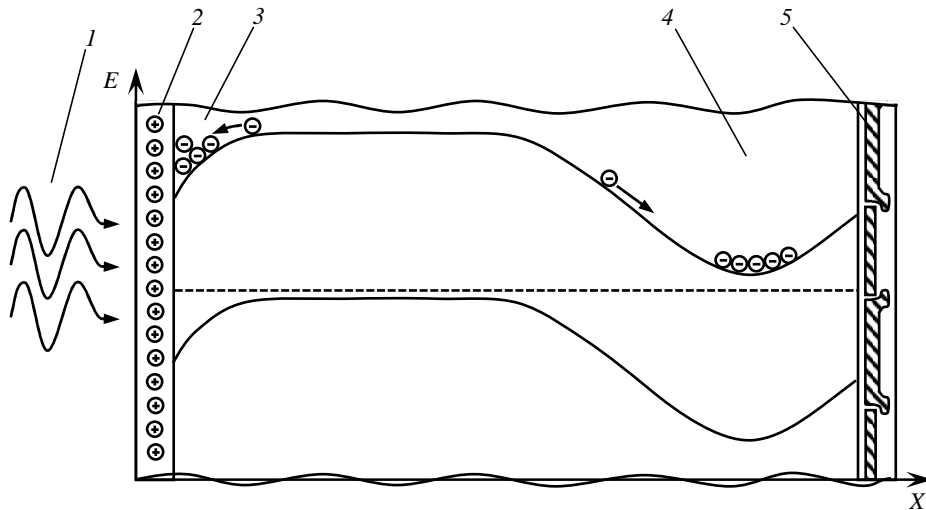


Рис. 3

2) формирование в приповерхностной области кремния тонкого и весьма сильно легированного p^{++} -слоя.

Далее будут рассмотрены различные способы сенсibilизации.

1. *Непосредственная зарядка поверхности.*

К этой группе способов относятся:

- облучение интенсивным УФ-излучением;
- обработка в активных газовых средах (NO , Cl_2);
- обработка в коронном разряде.

Для реализации данных способов необходимо предварительно пассивировать поверхность, сформировав на ней тонкий ($\sim 30 \text{ \AA}$) слой оксида [7]. Недостатки этих способов:

- нестабильность формируемого таким способом в слое естественного оксида отрицательного заряда;
- зависимость заряда от факторов окружающей среды;
- временной дрейф чувствительности приборов.

Вследствие этого данный метод в настоящее время не используется.

2. *Ионное легирование бором и импульсный лазерный отжиг.* В результате ионного легирования бором и импульсного лазерного отжига формируется приповерхностный p^+ -слой [8], формирующий электрическое поле требуемой направленности, отталкивающее фотоэлектроны от поверхности кристалла. Для реализации данной технологии необходимо в результате имплантации и отжига получить p^+ -слой с минимально возможной толщиной. Для этого необходимо:

- выполнить имплантацию с очень большой дозой и минимально возможной энергией;

– провести постимплантационный отжиг таким образом, чтобы обеспечить активацию примеси и осуществить отжиг имплантационных дефектов, при этом минимизировав разгонку p^+ -слоя в процессе постимплантационного отжига.

Недостатком данного метода является то, что подвергаемый обработке кристалл ФППЗ уже имеет алюминиевую металлизацию, таким образом, температура обработки должна быть меньше $400 \text{ }^\circ\text{C}$, а для отжига дефектов желательна температура не менее $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Решение – сканирующий отжиг с использованием наносекундного УФ-эксимерного лазера. Такой метод обработки освоен фирмой «e2v Technologies» (ранее – «EEV», «GEC Marconi»), а также в «МИТ-LL».

Существенным недостатком метода является чрезвычайная сложность обеспечения приемлемой однородности фоточувствительности и темнового тока по полю прибора. Дело в том, что в процессе кристаллизации локальной расплавленной области кремния на ее границе возникают сетки дислокаций в результате несовпадения объемов кремния в расплавленном и нерасплавленном состоянии. В результате образуется структура, которая в зарубежной литературе называется «brick wall pattern» – структура кирпичной стены. На рис. 4, а представлен характерный фотоотклик прибора, изготовленного этим способом на ОАО «ЦНИИ „Электрон“».

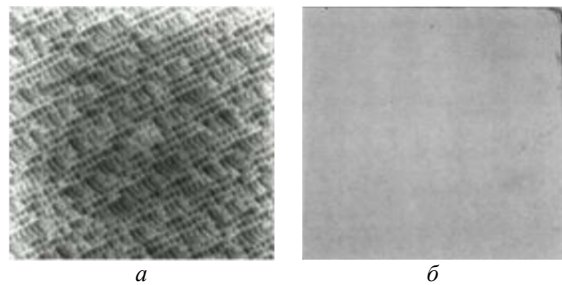


Рис. 4

3. *Молекулярно-лучевая эпитаксия или δ -легирование.* Этот метод [8], [9], так же как и предыдущий, заключается в формировании в приповерхностной области сильнолегированного бором p^+ -слоя, но в отличие от предыдущего этот слой Si:B создается методом молекулярно-лучевой (молекулярно-пучковой) эпитаксии (МВЕ). Поскольку создаваемый методом МВЕ p^+ -слой имеет очень малую толщину, его часто называют δ -слоем, а сам процесс сенсibilизации в этом случае называют δ -легированием.

Недостатки данного метода:

– для получения эпитаксиального слоя методом МВЕ требуется сверхвысокий вакуум (порядка 10^{-10} Торр);

– поверхность кремния перед нанесением эпитаксиального слоя должна быть очищена от молекулярных загрязнений посредством отжига при довольно высоких температурах (обычно более 600°C), но такие температуры невозможно применить в технологии ФППЗ, поскольку на лицевой поверхности приборной пластины уже сформирована алюминиевая металлизация.

Приборы, получаемые данным методом, имеют очень хорошие параметры. Квантовая эффективность для них ограничена практически только оптическим отражением, при этом приборы имеют очень хорошую однородность чувствительности (см. рис. 4, б).

4. *Хемосорбция на тонкой пленке металла.* Сущность метода заключается в формировании на поверхности ФППЗ очень тонкого слоя металла, который вызывает каталитическое разложение содержащихся в окружающей среде молекул кислорода на атомы, которые диффундируют сквозь пленку металла к границе естественного оксида кремния и хемосорбируются на ней в виде отрицательно заряженных ионов кислорода.

Существует ряд требований, предъявляемых к наносимой пленке металла:

– максимальная прозрачность для падающего излучения. В связи с этим толщина пленки (например, серебра) не должна превышать $10\dots 30 \text{ \AA}$. При относительно больших толщинах пленка начинает значительно поглощать и отражать излучение;

– пленка не должна затруднять диффузию диссоциировавших молекул газа на границу раздела металл– SiO_2 ;

– метод осаждения пленки должен быть щадящим по отношению к прибору, а полученная пленка должна обладать хорошей адгезией к оксиду кремния.

При использовании для сенсibilизации поверхности сверхтонкой пленки металла встает вопрос о времени жизни сорбированных на поверхности ионов, а также о влиянии температуры на этот параметр. Время жизни τ зависит от энергии активации процесса хемосорбции ΔH_{ads} и может быть приблизительно рассчитано по следующей формуле:

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta H_{ads}/RT),$$

где τ_0 – постоянная, определяемая типом ионов; R – универсальная газовая постоянная; T – температура. Энергия активации процесса хемосорбции кислорода на серебре ΔH_{ads} составляет 177 ккал/моль.

Современные ФППЗ с освещением с обратной стороны подложки. В настоящее время актуальной является задача создания ФППЗ с фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне от УФ- до ближней инфракрасной (ИК) области ($0.2\dots 1.06 \text{ мкм}$). Созданием подобных ФППЗ за рубежом занимаются такие фирмы, как «e2v Technologies», «Fairchild», «Dalsa» и «Hamamatsu». В России производством ФППЗ занимаются ОАО «ЦНИИ „Электрон“» и ОАО «НПП „Пульсар“».

Универсального ФППЗ с высокой квантовой эффективностью как в УФ-области, так и в видимом и ближнем ИК-диапазоне создать невозможно. Так, у ФППЗ фирмы «Hamamatsu» квантовая эффективность в диапазоне $280\dots 380 \text{ нм}$ превышает 40 % (см. рис. 2), а на длине волны 233 нм составляет 70 %, однако в видимом диапазоне хотя и достигает 90 % на длине волны 600 нм, но не превышает характеристики аналогичных ФППЗ других производителей, в том числе и ОАО «ЦНИИ „Электрон“». Высокая чувствительность в УФ области достигнута в фотоприемных устройствах ФПУ-1М [10], выпускаемых в ОАО «ЦНИИ „Электрон“». В видимом диапазоне максимум квантовой эффективности таких ФППЗ не превышает 72 %, однако в УФ-области этот параметр значительно (более чем на 10 %) лучше мировых аналогов, а на длинах волн 240 и 260 нм превышает 90 %.

Достигнутые в ОАО «ЦНИИ „Электрон“» высокие значения квантовой эффективности (см. рис. 2) получены на ФППЗ, освещаемых с обратной стороны подложки, созданных с использованием ионной имплантации с последующим лазерным отжигом. Однако, несмотря на распространенность этой технологии, у нее имеется существен-

ный недостаток, связанный с неоднородностью кристаллизации кремния после локального расплавления лазером. Улучшение этого параметра при производстве ФППЗ позволит еще более повысить фотоэлектрические параметры отечественных ФППЗ.

Все методы повышения фоточувствительности ФППЗ, освещаемых с обратной стороны подложки, обладают достоинствами и недостатками. Однако большинство зарубежных фирм используют метод ионного легирования с последующим

лазерным отжигом. Достигаемые с использованием этого метода в технологии производства ФППЗ фотоэлектрические параметры, надежность ФППЗ, включая устойчивость к воздействию факторов внешней среды, технико-экономические показатели, степень освоенности метода (время, требуемое для внедрения технологии) делают метод ионного легирования с лазерным отжигом наиболее востребованным для исследования и внедрения в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lesser M. Silicon sensor quantum efficiency, reflectance and calibration // Proceedings of SPIE. 1996. Vol. 2654. P. 915 411–915 423.
2. Алымов О. В. Линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда для ориентации космических аппаратов по Солнцу: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013.
3. Алымов О. В. Линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда для ориентации космических аппаратов по Солнцу: дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013.
4. Алымов О. В., Арутюнов В. А., Быстров Ю. А. Погрешность измерения угловой координаты линейным фоточувствительным прибором с переносом заряда // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 9. С. 20–23.
5. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.
6. 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.
7. Backside charging of the CCD / J. Janesick, T. Elliot, T. Daud, J. McCarthy // Proceedings of SPIE. 1985. Vol. 570. P. 570 008–570 016.
8. Low-Dark-Current, Back-Illuminated Charge-Coupled-Devices / R. C. Westhoff, B. E. Burke, H. R. Clark et al. // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7249. P. 724 963–724 974.
9. Dziuban J. Bonding in Microsystem Technology. Heidelberg: Springer, 2009. 349 p.
10. Современные фотоприемники для видимого, УФ- и ближнего ИК-диапазонов спектра производства в компании «ЦНИИ „Электрон“» / О. Алымов, И. Васильев, В. Минкин, С. Татаурщиков // Фотоника. 2014. № 2. С. 40–46.

E. G. Lobanova

Engineer of JSC «Central Research Institute „Electron“» (Saint-Petersburg)

METHODS OF INCREASING SENSITIVITY OF BACK-SIDE CHARGE-COUPLED DEVICES

Describes the basic methods of sensitizing the photosensitive surface of charge-coupled devices with the light from the substrate side (back-thinned or back-side charge coupled devices – BTCCD). Discussed in detail are the advantages and disadvantages of each method allowing the technology of BTCCD.

Back-thinned charge coupled device, sensibilization, chemical adsorption, ion doping, laser annealing, molecular beam epitaxy