

СЕМЕЙСТВО КРУПНОФОРМАТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ С РАЗРЕШЕНИЕМ 38,5 ПАР ЛИН/ММ

© 2009 г. Е. В. Костюков, канд. техн. наук; А. М. Маклаков; А. С. Скрылев, канд. техн. наук

Научно-производственное предприятие “Пульсар”, Москва

E-mail: pulsar@dol.ru

Рассмотрены особенности конструкции и технологии изготовления серии линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС) с числом элементов от 3072 до 6144. Приборы имеют шаг расположения фоточувствительных элементов 13 мкм, что обеспечивает разрешение 38,5 пар лин/мм. Приведены основные геометрические и фотоэлектрические параметры ЛФПЗС.

Ключевые слова: прибор с зарядовой связью, линейный ФПЗС: процесс изготовления, параметры, характеристики.

Коды OCIS: 040.1240, 040.1520.

Поступила в редакцию 30.03.2009.

Обзор семейства

Известная в течение ряда предшествующих лет серия линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ЛФПЗС) с билинейной организацией считывания зарядовой информации из фотодиодного накопителя с шагом элементов 13 мкм значительно расширена за счет разработки новых крупноформатных приборов. К ЛФПЗС с числом элементов 256, 512, 1024 и 2048 [1] добавлены приборы, имеющие 3072, 4096 и 6144 элементов с длиной фоточувствительной области от 40 до 80 мм. Основное отличие крупноформатных ЛФПЗС от приборов с числом элементов 256–2048 состоит в организации считывания не по двум сдвиговым ПЗС-регистрам в одну сторону к раздельным выходным устройствам, а по четырем – в противоположные стороны

ны от середины фотообласти к четырем выходам соответственно (рис. 1). Такая организация за счет параллельной обработки информации обеспечивает сохранение быстродействия на уровне приборов-предшественников, несмотря на значительное увеличение числа элементов.

Конструкция ЛФПЗС

Кристаллы серии крупноформатных ЛФПЗС смонтированы в специально разработанные металлокерамические основания типа DIP с расстоянием между рядами выводов 10 мм и загерметизированы входными оптическими окнами. Внешний вид приборов представлен на фотографии (рис. 2).

Фоточувствительная область представляет собой традиционную конструкцию [2], состоящую из линейки фотодиодов на основе $p-n$ -перехода в качестве фоточувствительных элементов и трех затворов с функциями:

- 1) затвор барьерный (ЗБ) – смещение фотодиодов,
- 2) фотозатвор (ЗФ) – накопление фотогенерированного заряда,
- 3) затвор разрешающий (ЗР) – параллельная передача накопленной зарядовой информации в сдвиговые регистры.

В исходной конструкции сдвиговых регистров приборов-предшественников за счет изменения

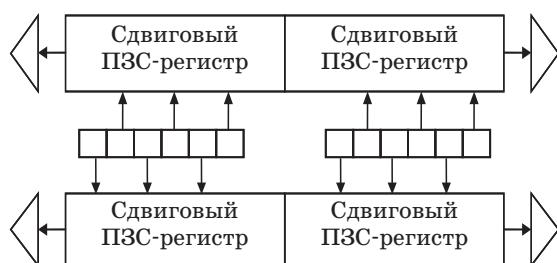


Рис. 1. Блок-схема приборов серии крупноформатных ЛФПЗС.



Рис. 2. Фотография серии ЛФПЗС.

коммутации электродов хранения и переноса в топологии кристаллов достигнут разнонаправленный перенос к расположенным по углам структуры выходным устройствам.

Для примера на рис. 3 приведена функциональная схема ЛФПЗС, имеющего 6144 фоточувствительных элемента, а в табл. 1 – его цоколевка. Как видно из представленной схемы, каждый сдвиговый регистр секционирован на две части, имеющие раздельное фазное управление при сохранении регулярности электродной структуры. Тем самым обеспечивается возможность снижения емкостной нагрузки на управляющие драйверы.

Технологический процесс изготовления кристаллов ЛФПЗС

Технологический маршрут изготовления ЛФПЗС основан на базовом маршруте [3] и представляет собой единую цепочку, включающую перечисленные далее технологические операции (рис. 4).

1. *Создание полевого окисла.* На поверхности кремниевой подложки *p*-типа формируются ионолегированные области *p*-типа, самосовмещенные с толстым (1 мкм) слоем термически выращенной пленки двуокиси кремния. В качестве маски при окислении используется пленка Si_3N_4 . Комбинация указанных областей и окисла выполняет функцию стоп-каналов и обеспечивает изоляцию активных областей. Кроме этого, паразитные емкости внутренних межсоединений уменьшаются в 5–10 раз. Далее обеспечивается возможность изготовления самосовмещенных фотодиодов в области накопления, скрытоактивных регистров в области переноса заряда, а также стоков и истоков транзисторов выходного устройства.

2. *Создание подзатворного диэлектрика и скрытого канала.* Данный технологический блок включает в себя операции термического (обычно пирогенного) окисления Si на поверхности активных областей (толщина подзатворного

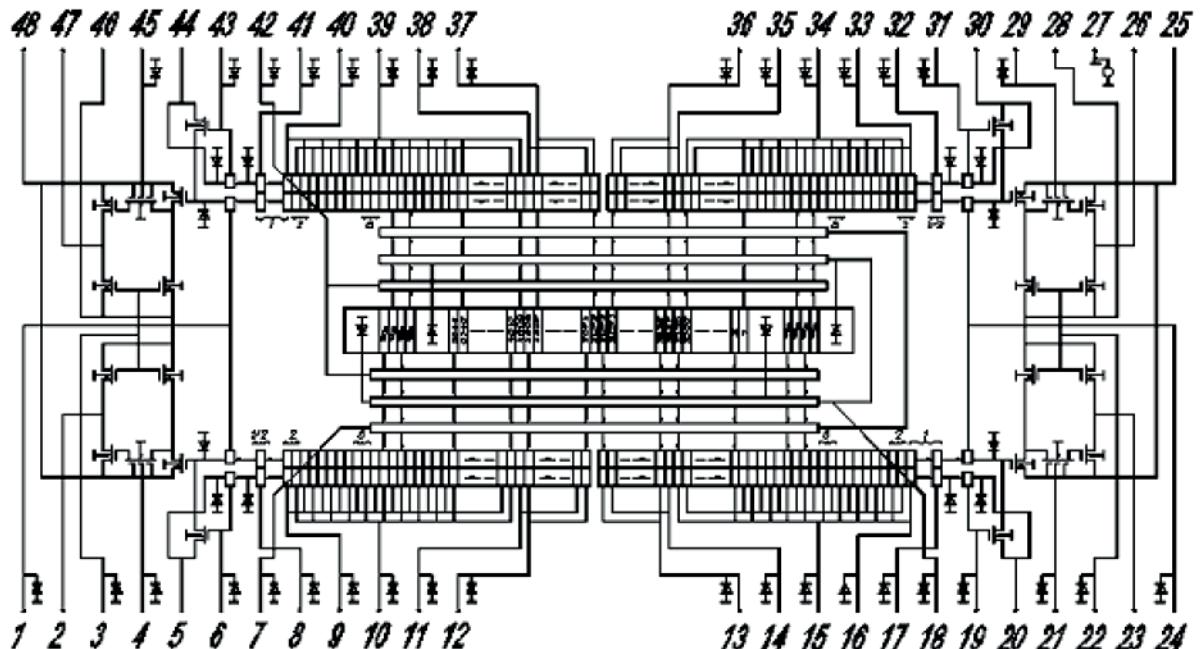


Рис. 3. Функциональная схема ЛФПЗС.

Таблица 1. Цоколевка ЛФПЗС с 6144 элементами

Номер вывода	Обозначение	Функциональное назначение выводов
1	Звых1	Затвор выходной 1
2	ВыхB	Выход B
3	Зн1	Затвор нагрузки 1
4	Зв-хрB	Затвор транзистора выборки-хранения B
5	СвB	Сток восстановителя потенциала B
6	ЗвB	Затвор восстановителя потенциала B
7	ЗР	Затвор разрешающий
8	ЗуB	Затвор ускоряющий B
9	Φ21B	Фаза вторая секции 1 регистра B
10	Φ11B	Фаза первая секции 1 регистра B
11	Φ22B	Фаза вторая секции 2 регистра B
12	Φ12B	Фаза первая секции 2 регистра B
13	Φ12C	Фаза первая секции 2 регистра C
14	Φ22C	Фаза вторая секции 2 регистра C
15	Φ11C	Фаза первая секции 1 регистра C
16	Φ21C	Фаза вторая секции 1 регистра C
17	ЗуC	Затвор ускоряющий C
18	ЗФ	Фотозатвор (затвор накопительный)
19	ЗвC	Затвор восстановителя потенциала C
20	СвC	Сток восстановителя потенциала C
21	Зв-хрC	Затвор транзистора выборки-хранения C
22	И2	Исток 2
23	ВыхC	Выход C
24	C2	Сток 2
25	Звых2	Затвор выходной 2
26	ВыхD	Выход D
27	П	Подложка
28	Зн2	Затвор нагрузки 2
29	Зв-хрD	Затвор транзистора выборки-хранения D
30	СвD	Сток восстановителя потенциала D
31	ЗвD	Затвор восстановителя потенциала D
32	ЗуD	Затвор ускоряющий D
33	Φ21D	Фаза вторая секции 1 регистра D
34	Φ11D	Фаза первая секции 1 регистра D
35	Φ22D	Фаза вторая секции 2 регистра D
36	Φ12D	Фаза первая секции 2 регистра D
37	Φ12A	Фаза первая секции 2 регистра A
38	Φ22A	Фаза вторая секции 2 регистра A
39	Φ11A	Фаза первая секции 1 регистра A
40	Φ21A	Фаза вторая секции 1 регистра A
41	ЗуA	Затвор ускоряющий A
42	ЗБ	Затвор барьерный
43	ЗВА	Затвор восстановителя потенциала A
44	СвA	Сток восстановителя потенциала A
45	Зв-хрA	Затвор транзистора выборки-хранения A
46	И1	Исток 1
47	ВыхA	Выход A
48	C1	Сток 1

окисла 0,05 мкм) и пиролитического осаждения подзатворного Si_3N_4 (толщиной 0,065 мкм).

Далее проводится высокоэнергетичная прецизионная имплантация ионов мышьяка через

двуслойный подзатворный диэлектрик. Это позволяет обеспечить идентичность характеристик подзатворной системы для всех уровней поликремниевых электродов при их последующем

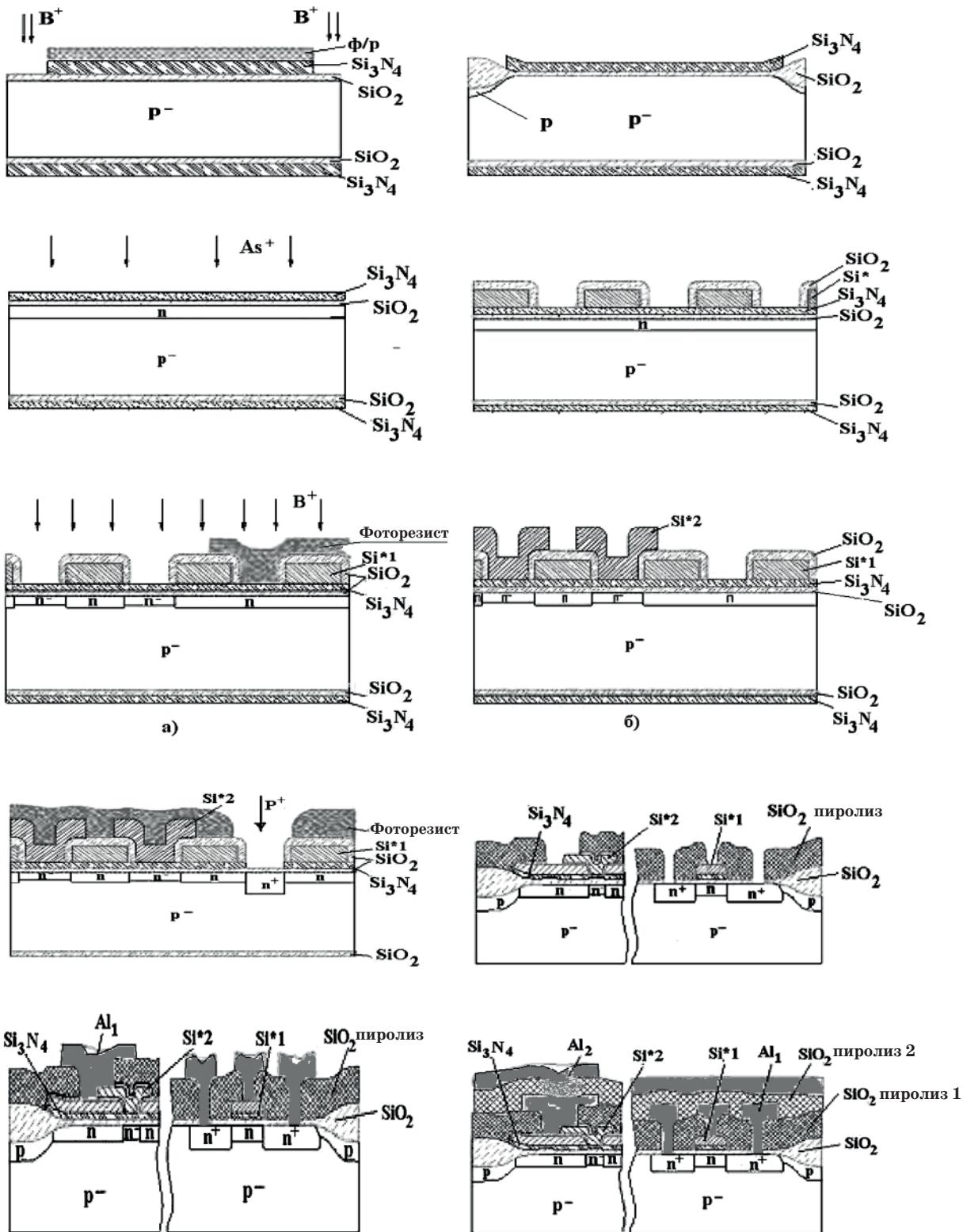


Рис. 4. Основные этапы технологического процесса.

- 1-я строка – создание полевого окисла: а – структура после фотолитографии по нитриду кремния, б – структура с полевым окислом;
- 2-я строка – а – структура с двухслойным подзатворным диэлектриком и скрытым каналом, б – формирование первого уровня электродной системы;
- 3-я строка – создание многоуровневой системы затворов: а – ионная имплантация бора в зазоры между электродами первого уровня, б – формирование 2-го уровня электродной системы;
- 4-я строка – а – создание фотодиодов в области накопления и областей истоков и стоков, б – создание диэлектрической изоляции с контактными окнами под металлизацию;
- 5-я строка – а – создание metallизации, б – создание оптического экрана.

формировании и исключает нежелательное перераспределение имплантированной примеси между кремнием и окислом вследствие сегрегации. Для формирования объемного канала примеси имплантируются очень малыми дозами (порядка нескольких десятых долей микрокулон на 1 см²) с высокой точностью и воспроизводимостью (отклонения составляют несколько процентов).

3. Создание многоуровневой системы затворов. Комплекс операций для создания каждого уровня включает в себя пиролитическое осаждение слоя поликристаллического кремния толщиной около 0,5 мкм и его легирование фосфором до уровня, определяемого требуемым поверхностным сопротивлением.

Легирование осуществляется диффузией из газовой фазы при температуре ниже 1000 °C, что препятствует разгонке объемного канала. Далее проводится фотолитография для получения топологии электродной структуры, затем с целью изоляции электродов одного уровня от электродов другого – низкотемпературное межслойное окисление поликремния (толщина SiO₂ равна 0,30–0,35 мкм). Пониженная температура процесса требует применения влажной окислительной среды при сохранении низкой плотности проколов и, соответственно, процента выхода годных. В технологическом маршруте изготовления двухфазных ЛФПЗС, имеющих два уровня электродов, между их формированием проводится ионная имплантация бора с целью создания потенциальных барьеров в скрытом канале для обеспечения одностороннего переноса.

4. Создание фотодиодов в области накопления и областей истоков и стоков. Эти области формируются методом самосовмещения по границам окон в полевом окисле и краям поликремниевых затворов при ионной имплантации фосфора с дозами несколько десятых долей и несколько сотен микрокулон на 1 см² соответственно. Для ЛФПЗС с фотодиодами используется последующая специальная термообработка, что обеспечивает устранение радиационных дефектов и снижение темновых токов.

5. Создание диэлектрической изоляции с контактными окнами под металлизацию. Для вскрытия контактных окон используются операции фотолитографии и травления термических окислов на разных уровнях поликремния и на монокремнии. С целью усиления диэлектрической изоляции электродной структуры от пересекающей ее металлизации проводится пиролитическое осаждение SiO₂ с высоким содержанием P₂O₅. Оксид с высоким содержанием фосфора,

имеющий толщину около 1 мкм, используется для формирования дополнительной межслойной изоляции, так как обладает высокой текучестью и способностью к “самозалечиванию” проколов при последующей термообработке.

Для ЛФПЗС с финишным диффузионным гетерированием края контактных окон, вскрытых в этом окисле, при этой термообработке оплавляются и обеспечивают снижение вероятности обрыва металлизации. При температуре 1070 °C в газовой фазе происходит насыщение фосфором обратной стороны подложки с целью создания “стока” для поглощения вредных примесей и дефектов кристаллической решетки, идущего на стадии дефорсажа диффузионного канала – медленного снижения температуры со скоростью не более четырех градусов в минуту. Окончательно проводятся пиролитическое осаждение SiO₂ толщиной около 0,3 мкм и повторное вскрытие контактных окон. Нелегированный SiO₂ малой толщины позволяет сформировать контактные окна с малыми размерами, хорошей адгезией и высокой воспроизводимостью.

6. Создание металлизации. Комплекс операций включает в себя магнетронное напыление первого слоя Al–Si–Cu толщиной около 1 мкм, фотолитографию по этому слою и вжигание в атмосфере водорода. Последняя операция обеспечивает уменьшение плотности поверхностных состояний в активных областях ЛФПЗС, что снижает неэффективность переноса заряда и уровень темнового тока.

7. Создание оптического экрана. Для оптического экранирования требуемых областей ЛФПЗС на первый слой металлизации осаждается слой пиролитического фосфоросиликатного стекла. Затем напыляется второй слой Al и с помощью фотолитографии формируются фоточувствительное окно и окна к контактным площадкам металлизации первого слоя. Последней проводится операция фотолитографии для вскрытия контактных окон и травление двуокиси кремния над контактными площадками.

Основные параметры и характеристики ЛФПЗС

Серия крупноформатных ЛФПЗС характеризуется геометрическими и фотоэлектрическими параметрами, приведенными в табл. 2 и 3 соответственно.

Как следует из табл. 2, “fill-factor” приборов рассматриваемой серии равен 100%, так как конструкцией обеспечивается равенство разме-

Таблица 2. Геометрические параметры ЛФПЗС

Обозначение	Наименование параметра, единица измерения	Норма		
$A_{\text{стр}}$	Число фоточувствительных элементов, шт	3072	4096	6144
$a \times b$	Размеры фоточувствительного элемента, мкм	13×13		
Δ_{Φ}	Шаг фоточувствительных элементов, мкм	13		
A_{Φ}	Длина фоточувствительной области, мм	39,94	53,25	79,88
N_p	Число сдвиговых регистров, шт	4		
N_t	Число темновых элементов в регистре, шт	2		
N_i	Число изолирующих элементов в регистре, шт	2		
N_b	Число буферных битов в регистре, шт – с обозначением А и С – с обозначением В и D	5,5 6		
N_c	Число секций управления регистром, шт	1	2	2
$N_{\text{инф}}$	Информационная емкость секции, бит	768	512	768
$N_{\text{вых}}$	Число выходных устройств, шт	4		
$N_{\text{выв}}$	Число выводов корпуса, шт	32	48	48

Таблица 3. Фотоэлектрические параметры ЛФПЗС

Обозначение	Наименование параметра, единица измерения	Норма		
		Мин.	Тип.	Макс.
K_m	Коэффициент передачи модуляции, %	50	60	80
$U_{\text{нас}}$	Напряжение насыщения, В	1,4	2	
S_U	Интегральная чувствительность, В/лк с	8	10	
δU_c	Относительная неравномерность выходного сигнала, %		10	20
δU_t	Относительная неравномерность темнового сигнала, %		0,08	0,1
$U_{\text{ш}}$	Квазипиковое напряжение шума, мВ		2,0	

Примечания: температура измерений $T = 25^{\circ}\text{C}$, частота вывода сигнала 2,5 МГц, время накопления 1мс, источник света – типа “А”.

ров фоточувствительных элементов и шага их расположения.

Спектральный диапазон чувствительности приборов охватывает диапазон длин волн от 0,25 до 1,0 мкм.

Заключение

Крупноформатные ЛФПЗС, рассмотренные в этой статье, с длиной фоточувствительной области от 40 до 80 мм обеспечивают разрешение от 15 до 30 лин/мм при сканировании страницы формата А4. Такие ЛФПЗС разработаны впервые в отечественной практике и, несомненно, найдут применение в различных областях науки и техники, в том числе специальной. Важно отметить, что при высоком уровне параметров приборы созданы на конструктивно-технологической основе серии ЛФПЗС с числом элементов до 2048,

устойчивый выпуск которой освоен на ведущих предприятиях полупроводниковой электроники Российской Федерации и Республики Беларусь. Новые приборы существенно расширяют возможности серии, в первую очередь по разрешающей способности, практически без снижения быстродействия. Дальнейшее совершенствование приборов серии, особенно с наибольшей длиной фотообласти, лежит на пути обеспечения ее плоскости не хуже нескольких микрометров, что необходимо для применения в прецизионных системах с оптикой, имеющей крайне малую глубину резкости. Кроме того, представляется целесообразным изготовление кристаллов ЛФПЗС на эпитаксиальных структурах p^+ - p -типа, что позволит существенно снизить последовательное сопротивление подложки. Наконец, рассмотренная серия ЛФПЗС является предтечей для создания следующего поколения прибо-

ров с разрешением до 77 пар лин/мм при числе элементов до 12288.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюков Е.В., Павлова З.В., Пресс Ф.П. Линейные фоточувствительные микросхемы с зарядовой связью К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6 // Электрон. промышл. 1987. В. 3(161). С. 15–22.
 2. Костюков Е.В. Линейные фоточувствительные приборы с зарядовой связью с разрешением до 50 пар лин/мм // Интеграл. 2007. № 1. С. 3–8.
 3. Воронов В.В., Какоулин М.И., Костюков Е.В., Кузнецов Ю.А., Маклаков А.М., Скрылев А.С., Тихонов А.А., Трунов С.В., Пугачев А.А., Чернокожин В.В., Шилин В.А. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью – современная элементная база фотонных систем // Электрон. промышл. 2003. В. 2. С. 155–168.
-