

## Технологии компании e2v

Успех космических и военных программ сильно зависит от элементной базы, составляющей основу аппаратуры специального назначения. Многие крупные компании, производящие изделия космического базирования, используют матрицы компании e2v не только в системах ориентации по звездам, но и как высокочувствительные компоненты для бортового научного оборудования. Сегодня с помощью фотоизображений появляется возможность узнать о Вселенной больше, чем когда-либо ранее. Назовем, к примеру, регистрацию удаленных звезд, исследование черных дыр, составление детальной карты поверхности Марса и отслеживание изменения климата на Земле.

ПЗС-матрицы (ПЗС — прибор с зарядовой связью) компании e2v, благодаря своим незаурядным техническим характеристикам, признаны ведущими космическими агентствами, такими как NASA, ESA, JAXA и CSA. Обсерватории по всему миру применяют камеры и ПЗС-матрицы компании e2v для решения задач астрономической спектроскопии, адаптивной оптики и обработки изображений. Технология изготовления фоточувствительных сенсоров для космоса и астрономии в e2v развивалась в течение 30 лет, а качество выпускаемой продукции проверено большим числом реализованных проектов. Кроме того, компания специализируется на производстве фоточувствительных элементов для спектроскопии, микроскопии, кристаллографии, флюороскопии и бортового оборудования.

Максим ПЕТРОШЕНКО  
MaxPetroshenko@gmail.ru  
Дмитрий СОЛОМИЦКИЙ  
Solomitskiy@gmail.com

### Архитектура

Компания e2v серийно выпускает ПЗС-матрицы трех видов: фоточувствительные ПЗС (ФПЗС) с кадровым переносом, полнокадровые ФПЗС и линейные матрицы.

Архитектура полнокадровой матрицы реализует построчный способ считывания изображения после экспозиции. Каждая строка изображения считывается поочередно через горизонтальный регистр сдвига. В результате все пиксели кадра опускаются на строку ниже, и процесс повторяется, пока не считывается вся картинка целиком (рис. 1).

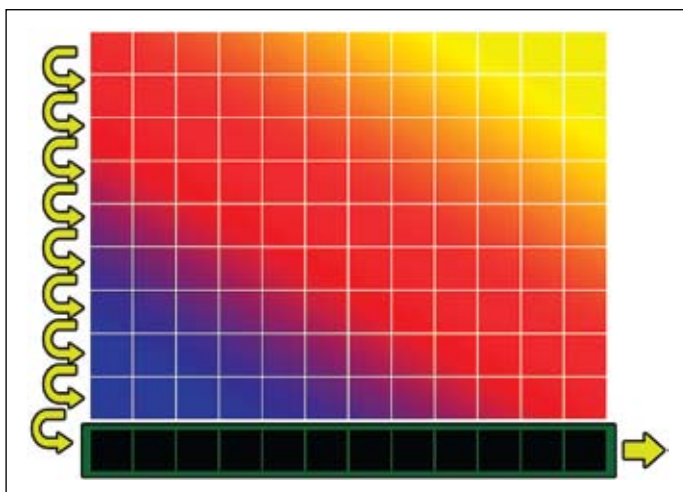


Рис. 1. Схематическое представление матрицы с полнокадровым переносом

Недостаток этого метода регистрации изображения — в проявлении такого эффекта, как смазывание (англ. smear), вызванного нежелательным поглощением света матрицей во время процесса считывания. Чтобы избежать смазывания, на устройство монтируют механический затвор, который закрывает матрицу на время переноса заряда к выходному усилителю. Однако механические затворы имеют сравнительно небольшой срок службы, ненадежны и довольно инерционны.

Тем не менее матрицы полнокадрового переноса наиболее чувствительны, поэтому они находят свое применение в таких областях, как наука, астрономия, космическое оборудование и профессиональная фототехника. В частности, большинство профессиональных зеркальных фотоаппаратов, микроскопов высокого разрешения, а также фото- и видеокамер, устанавливаемых на космические аппараты и телескопы, построены именно на этом типе матриц.

Среди серийной продукции компании e2v имеются следующие модели матриц с полнокадровым переносом: CCD30-11, CCD42-10, CD42-40, CCD42-90, CCD44-82, CCD47-10, CCD55-20, CCD55-30, CD62-06, CCD77-00, CCD203-82, CCD230-42, CCD230-84 и CCD231-84.

Архитектура ФПЗС с кадровым переносом практически ничем не отличается от архитектуры полнокадровой матрицы. Разница между ними лишь в том, что строки пикселей первоначально перемещаются в буферную зону, закрытую от попадания света тонкой пленкой (как правило, алюминия), откуда уже потом производится их последовательное считывание. Преимуществом такой конструкции по сравнению с полнокадровой ФПЗС является малое время экспозиции для первых двух кадров, поскольку во время считывания из буферной зоны чувствительная область может накапливать новый заряд (рис. 2).

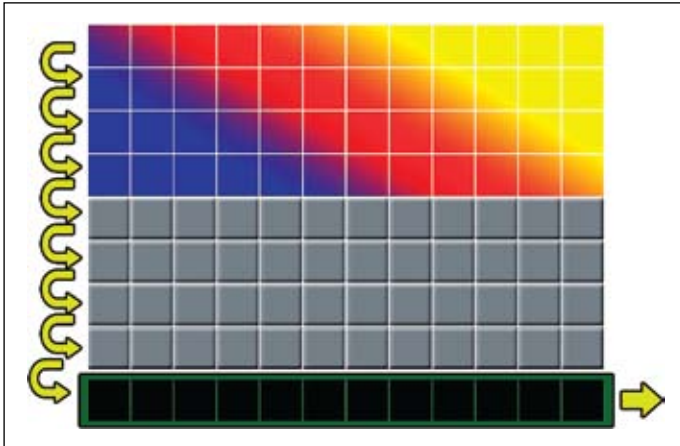


Рис. 2. Схематическое представление ФПЗС с кадровым переносом

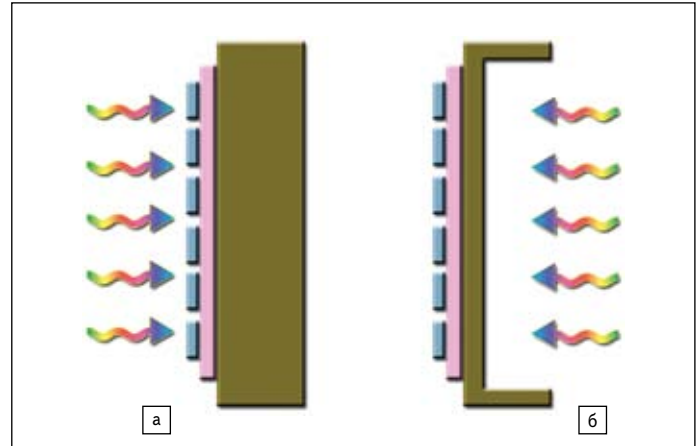


Рис. 4. а) Матрица с передней засветкой; б) матрица с задней засветкой

Однако наличие такой буферной зоны значительно увеличивает стоимость матрицы. Вдобавок ко всему заряду требуется пройти в два раза большее расстояние, что приводит к его «растеканию». Стоит отметить, что матрица с буферизацией кадра не уступает в чувствительности полнокадровой, поэтому этот тип матриц широко используется в таких областях, как, например, флуоресцентная микроскопия, где требуется сделать два быстрых последовательных снимка наблюдаемого явления.

К серийным моделям матриц с кадровым переносом относятся: CCD60, CCD65, CCD97, CCD201-20, CCD39-01, CCD39-02, CCD47-20, CCD48-20, CCD57-10 и CCD67.

Третий вид матриц, которые компания e2v выпускает преимущественно под заказ, — это линейные ФПЗС, представляющие собой строку или несколько строк пикселей. Соответственно, для получения изображения объекта или сцены матрица должна просканировать пространство, поэтому такие сенсоры, как правило, применяются в сканирующей технике либо для съемки движущихся объектов.

Линейные матрицы, использующие технологию временной задержки накопления (ВЗН), применяются для регистрации быстро движущихся объектов. Дело в том, что объект за время накопления (если он перемещается с достаточно большой скоростью) может сильно сместиться относительно сенсора, что приведет к смазыванию изображения.

Для того чтобы этого не происходило, в линейной матрице строки передвигаются синхронно с движением объекта, продолжая при этом накапливать заряд, делая картинку четкой и насыщенной. Соответственно в ВЗН-сенсоре, скажем, со 128 строками накопления насыщенность будет в 128 раз выше, чем в ФПЗС с одной строкой либо не использующей технологию ВЗН (рис. 3).

### Тип засветки

По расположению светочувствительной поверхности все ПЗС-матрицы можно разделить на два типа: с передней и с обрат-

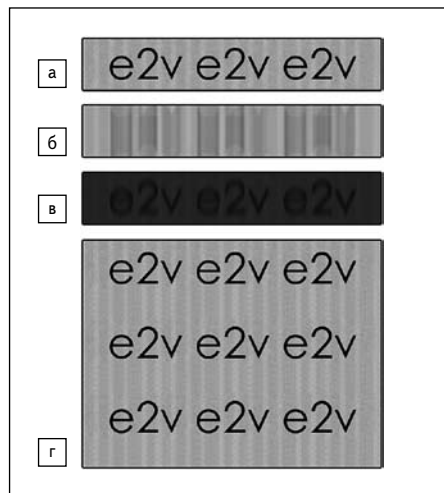


Рис. 3. Изображение, полученное с помощью линейных сенсоров, при съемке вращения барабана с надписью "e2v":  
а) барабан в зафиксированном положении, сенсор сканирует надпись сверху вниз;  
б) барабан вращается, технология ВЗН не используется;  
в) барабан вращается, используется затвор;  
г) непрерывная съемка с технологией ВЗН

ной засветкой. Условно будем считать сторону, на которой располагаются токоведущие и управляющие каналы, — передней, а противоположную — задней.

### Матрицы с передней засветкой

У ПЗС-матрицы с передней засветкой, как следует из названия, светочувствительная область располагается спереди. Фотоны, попадая на поверхность пикселя со стороны электродов, поглощаются в верхнем слое кремния вблизи области *p-n*-перехода. Толщина такого устройства, как правило, составляет около 300 микрон, это нивелирует такой эффект, как интерференция падающей и отраженной волны (о нем будет подробнее рассказано ниже), что характерно для ближнего инфракрасного диапазона. Такие ФПЗС недороги, надежны и просты в эксплуатации. Однако ввиду того, что фотоны должны сначала пройти сквозь токоведущие

каналы и не рассеяться, полная квантовая эффективность матриц с передней засветкой ниже по сравнению с аналогичными устройствами с обратной засветкой.

К серийно выпускаемым матрицам данного типа относятся: CCD65, CCD97, CCD201-201, CCD30-11, CCD42-10, CCD42-40, CCD47-10, CCD55-30, CCD62-06, CCD77-00, CCD230-42, CCD230-84, CCD47-20 и CCD67.

### Матрицы с задней засветкой

ПЗС-матрицы с задней засветкой намного тоньше аналогичных сенсоров с передней засветкой (стандартная толщина составляет порядка 15–20 мкм) и напоминают скорее фоточувствительную мембрану. Достигаются такие значения толщины посредством предварительной шлифовки подложки с последующим изотропным травлением. ФПЗС, выполненная по такой технологии, облучается светом с обратной стороны кристалла (рис. 4). Поэтому фотоны могут поглощаться сразу в толще кремния без какого-либо взаимодействия с токоведущими и управляющими элементами матрицы, что резко повышает квантовую эффективность и величину от-

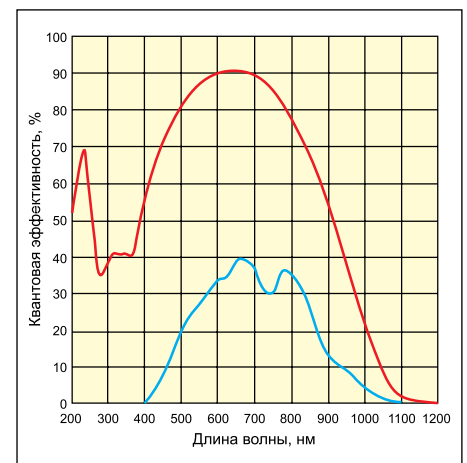


Рис. 5. Зависимость квантовой эффективности от длины волны: синяя кривая соответствует ФПЗС с передней засветкой; красная — с задней засветкой

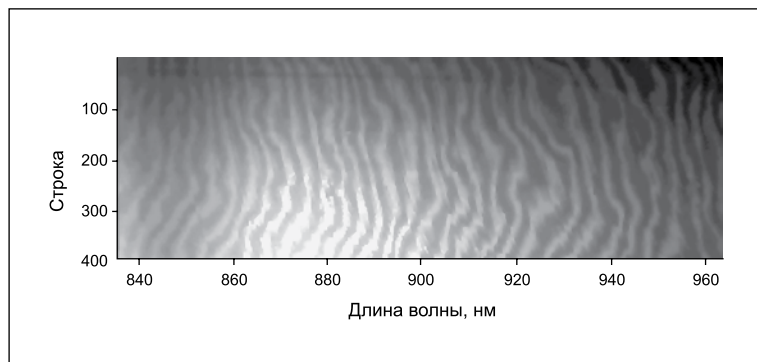


Рис. 6. Эффект интерференции падающих и отраженных волн внутри матрицы

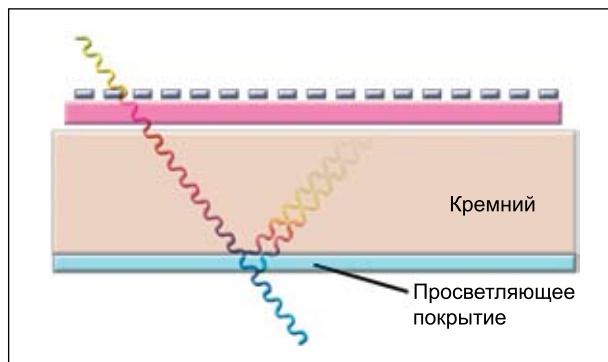


Рис. 7. Принцип действия просветляющего покрытия

клика устройства на облучение светом с более короткой длиной волны (рис. 5).

Недостатки этого типа устройств — их повышенная стоимость, малая глубина потенциальной ямы и наличие перепадов потенциала из-за возможного неоднородного травления.

Серийные модели матриц с обратной засветкой: CCD60, CCD97, CCD201-20, CCD30-11, CCD42-40, CCD42-90, CCD44-82, CCD47-10, CCD55-20, CCD55-30, CCD77-00, CCD203-82, CCD230-42, CCD230-84, CCD231-84, CCD39-01, CCD39-02, CCD47-20, CCD48-20, CCD57-10 и CCD67.

### Интерференция падающих и отраженных волн и борьба с ней

Помимо прочих недостатков, в матрицах с обратной засветкой проявляется эффект интерференции падающих и отраженных волн при частоте падающего света, соответствующей ближнему инфракрасному (ИК) диапазону. Волна, попадая в толщу полупроводника с обратной стороны, может отразиться от передней поверхности и, вернувшись назад, проинтерферировать с падающей волной. В итоге, в зависимости от того, сколько раз длина волны укладывается на толщине пикселя, интерференция может либо увеличить, либо уменьшить амплитуду результирующей волны. Зависимость чувствительности пикселя от длины волны становится периодической функцией (рис. 6) с периодом порядка 5 нм (для обычной ПЗС-матрицы с обратной засветкой).

Для борьбы с этим эффектом используют подложку из эпитаксиального кремния толщиной 40–50 мкм, что увеличивает квантовую эффективность и уменьшает вероятность того, что волна пройдет пиксель насквозь и, отразившись, вернется. Пиксель покрывают с обеих сторон специальным просветляющим покрытием со сверхмалым коэффициентом отражения (рис. 7) для волн ИК-диапазона, что значительно уменьшает переотражение. Результат применения такой технологии наглядно показан на рис. 8. Волна, отраженная от поверхности просветляющего слоя, интерферирует с волной, отраженной

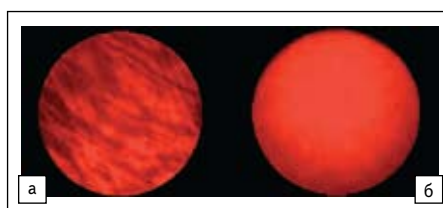


Рис. 8. Изображения, полученные сенсорами в ближнем ИК-диапазоне: а) обыкновенный сенсор; б) сенсор с подавлением эффекта интерференции падающих и отраженных волн

от границы раздела кремний — покрытие, и полностью гасит ее. По сравнению с обыкновенной ПЗС-матрицей квантовая эффективность такого устройства в зоне ближнего инфракрасного излучения намного выше.

### Способы увеличения квантовой эффективности в ближнем ИК-диапазоне

Для детектирования инфракрасного излучения с длиной волны порядка 1 мкм применения эпитаксиального кремния уже недостаточно, поскольку при толщине подложки в 50 мкм внутри нее появляются серьезные механические напряжения, которые ухудшают качество устройства. Компания e2v создала сенсор на основе так называемого «объемного» кремния — высокоомного материала, из которого можно изготавливать подложки толщиной до 100 мкм. По этой технологии была создана ПЗС-матрица CCD44-82.

Более того, в случае приложения еще и более высокого потенциала (рис. 9) к управляющему затвору квантовая эффективность такого сенсора резко возрастает вследствие увеличения размеров области обеднения и глубины квантовой ямы. Такая технология называется глубоким обеднением. Это направление стремительно развивается, и, возможно, в скором будущем появятся сенсоры с квантовой эффективностью порядка 100% в широком спектральном диапазоне.

Серийно выпускаемая модель, где используется технология глубокого обеднения, — CCD30-11.

В тех случаях, когда глубину обеднения нужно увеличить еще больше, используют технологию Ni-Rho. Основная сложность заключается в том, что величина глубины обеднения пропорциональна корню из прикладываемого напряжения и удельного сопротивления кремния. Однако оба этих параметра имеют предел. Для преодоления этого ограничения e2v предложила использовать защитный диод. Этот элемент препятствует протеканию тока между передней и задней стороной матрицы, тем самым позволяя увеличить управляющее напряжение на затворе, толщину подложки и, как следствие, глубину обеднения. CCD261-84 — матрица, созданная по технологии Ni-Rho.

В матрицах с передней засветкой для увеличения квантовой эффективности пикселя в области ближнего ультрафиолетового излучения применяется технология открытого электрода. Структуру электрода модифицируют так, что большая его часть, поглощающая ультрафиолет, удаляется, что позволяет свету беспрепятственно проникать в толщу пикселя. Для того чтобы потенциал электрода не изменился, в канал дополнительно имплантируют кремний *p*-типа. При этом наблюдается значительное увеличение квантовой эффективности (для ультрафиолета

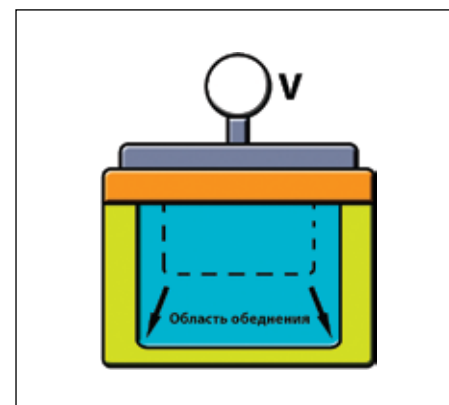


Рис. 9. Схематическое изображение пикселя: подложка сделана из специального материала, что позволяет прикладывать более высокое напряжение к затвору, увеличивая тем самым область обеднения и глубину квантовой ямы

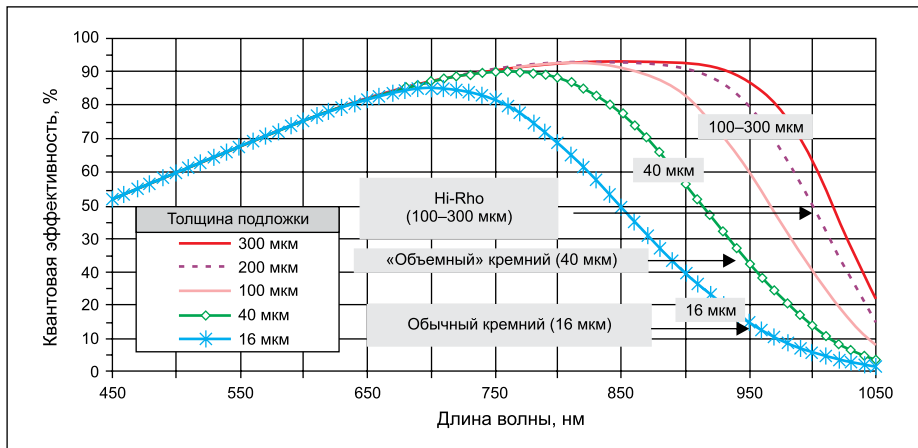


Рис. 10. Зависимость квантовой эффективности от длины волны для сенсоров с различной толщиной подложки

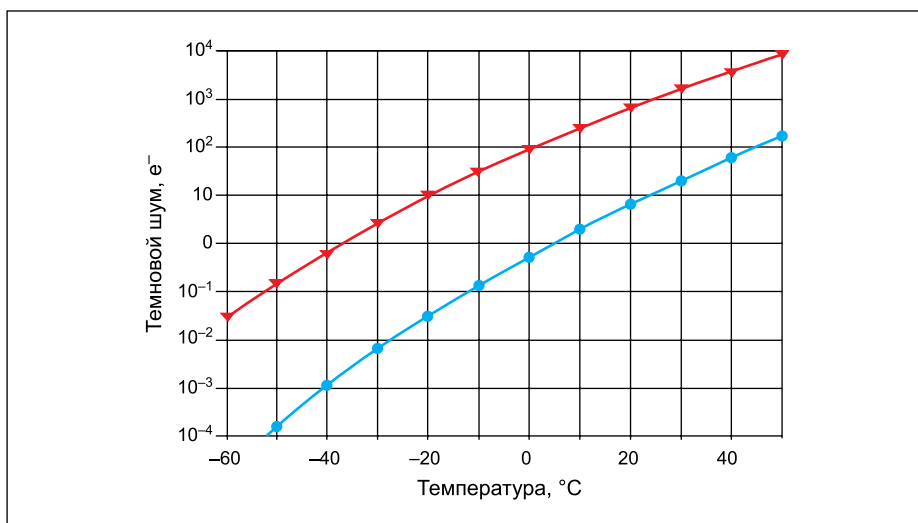


Рис. 11. Зависимость темнового шума от температуры (подразумевается удельный темновой шум, равный отношению шумового сигнала к размеру поля зрения): кривая синего цвета соответствует инвертированному режиму; красная — обычному

она возрастает примерно в два раза). Однако имеются и побочные эффекты: глубина потенциальной ямы уменьшается приблизительно на 40%. Такой открытый электрод присутствует в матрице CCD30-11 (OE).

Описанные технологии позволяют существенно увеличить квантовую эффективность ПЗС-матриц в ближнем ИК-диапазоне, что и показано на рис. 10.

### Способы уменьшения темнового тока

Для существенного снижения темнового тока в ПЗС-матрицах применяется инвертированный режим работы. При этом напряжение, управляющее переносом заряда от пикселя к пикселю, изменено на обратное, что приводит к рекомбинации участвующих в темновом токе электронов. Компания e2v выпускает следующие матрицы, работающие в инвертированном режиме: CCD60, CCD65, CCD97, CCD201-20, CCD77-00, CCD230-42 и CCD230-84.

Кроме того, усовершенствованный инвертированный полупроводник электрода, управляющего глубиной потенциальной ямы, дополнительно легируется (обычно бором или фосфором), что приводит к сильному понижению темнового (термального) шума (рис. 11). Размер пикселя составляет 22 мкм.

Матрицы, работающие в таком режиме, способны регистрировать свет с низкой интенсивностью даже при комнатной температуре. Однако для использования таких сенсоров в астрономии, где интенсивность света может быть сверхнизкой, требуется дополнительное охлаждение.

Усовершенствованный инвертированный режим применяется в матрицах CCD30-11, CCD42-10, CCD42-40, CCD47-10, CCD55-20, CCD55-30, CCD62-06, CCD47-20, CCD57-10 и CCD67.

Еще один метод уменьшения темнового тока — применение зарядового смещения. Этот способ заключается в том, что напряжение на затворе потенциальной ямы во время накопления не остается постоянным.

Для переноса заряда от пикселя к пикселю используется несколько контактов, поочередное увеличение потенциала на которых заставляет заряд смещаться к соседнему пикселю, а по окончании цикла полностью «перетекать» в соседнюю потенциальную яму. Однако эти же контакты можно использовать не только для переноса заряда, но и для осуществления зарядового смещения: за время накопления на них поочередно подается напряжение, что заставляет заряд «колебаться из стороны в сторону». Темновой ток в таком случае практически полностью подавляется.

В условиях слабой освещенности, когда уровень сигнала слишком низок, применение обычных транзисторных усилителей неприемлемо из-за их высоких шумов. В таких случаях используется электронный умножитель, принцип работы которого позволяет усилить сигнал с точностью до нескольких электронов. Устройство электронного умножителя основывается на эффекте вторичной электронной эмиссии, а его конструкция включает в себя ряд последовательных пластин (динодов) из специального материала. Электрон, попадая на динод, выбивает из него несколько электронов, которые в свою очередь, ускорившись под действием электрического поля, также могут выбить из следующей пластинки данного материала по несколько электронов каждый и т.д. В итоге на выходе мы можем увидеть многократно усиленный сигнал. Однако конструкция электронного умножителя может и не содержать динодов, а представлять собой изогнутую трубку, как показано на рис. 12. Все семейство матриц L3Vision оснащено электронными умножителями, в частности сенсоры CCD60, CCD65, CCD97 и CCD201-20.

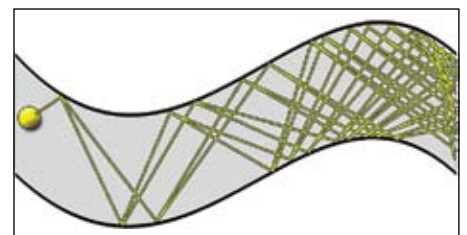


Рис. 12. Принцип действия электронного умножителя

### Корпус и система охлаждения

ПЗС-матрицы компании e2v имеют различные системы охлаждения, в той или иной степени уменьшающие шум ФПЗС. Матрицы с пассивным охлаждением отводят тепло через корпус, который может быть металлическим или керамическим. Перечислим модели матриц в металлических корпусах: CCD203-82, CCD42-90, CCD44-82 и CCD47-10.

Использование керамики обусловлено тем, что свойства любого материала, в том числе и электропроводные, зависят от испытываемых кристаллом деформаций. Керамика имеет схожий с кремнием коэффициент те-

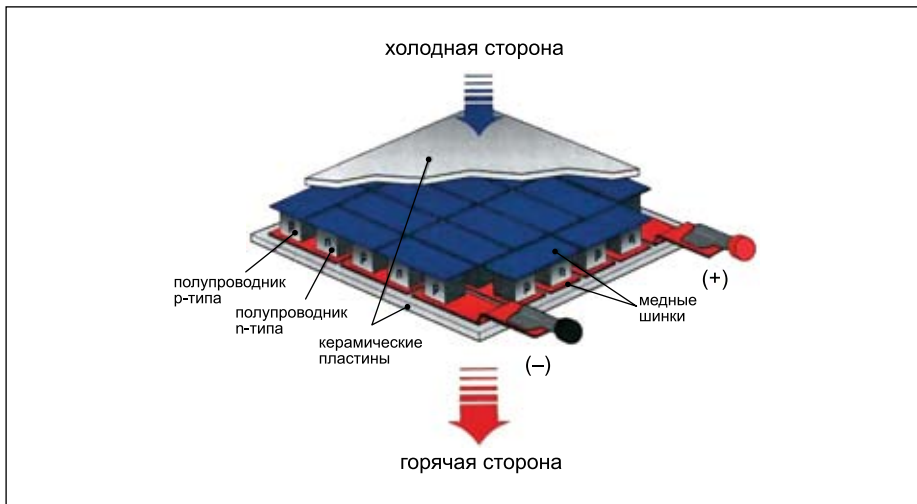


Рис. 13. Устройство охлаждения на основе элемента Пельтье

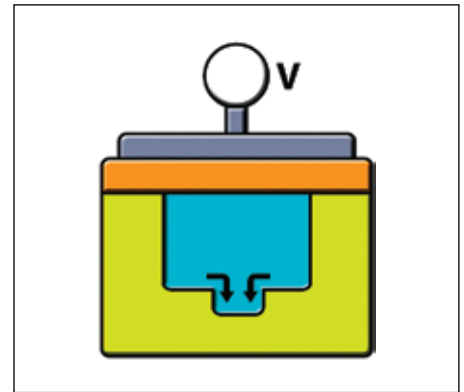


Рис. 14. Схематическое изображение канавки внутри потенциальной ямы

электроны быстро уходят в подложку, тогда как дырки накапливаются около поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub>. В итоге этот накопленный заряд приводит к смещению порогового напряжения (пороговый сдвиг). Опыты показали, что уменьшение толщины оксида ведет к уменьшению смещения напряжения, поэтому при производстве радиационно-стойких матриц оксидную пленку стараются сделать как можно тоньше.

Высокоэнергетичные нуклоны, попадая в матрицу, создают в ней большое количество дефектов, которые привносят дополнительные энергетические уровни в запрещенную зону полупроводника. Такие уровни могут служить «ловушками» для носителей заряда при передаче сигнала от пикселя к пикселю, и, как следствие, происходит уменьшение коэффициента передачи заряда.

При большой освещенности — например, когда производится съемка Земли — все «ловушки» практически сразу будут заняты, поэтому бороться с этим эффектом нет нужды. Однако если освещенность низкая и уровень сигнала весьма слабый, этим эффектом уже нельзя пренебречь. В качестве одного из методов борьбы с понижением коэффициента передачи используют метод «канавок» (рис. 14). Количество электронов, попавших в «ловушки», прямо пропорционально площади, в которой накапливается заряд. Поэтому в потенциальной яме делают небольшую канавку, куда и «стекает» небольшой накопленный заряд. Соответственно, площадь мест, где накапливается заряд, при малой освещенности резко уменьшается.

Еще один способ борьбы — инжекционные структуры. Эти структуры через определенные промежутки времени инжектируют заряд в матрицу, который передается от пикселя к пикселю, постепенно нейтрализуя все «ловушки».

Также применяют ПЗС-матрицы с *p*-каналом, где носителями заряда являются дырки. Дело в том, что коэффициент образования «ловушек» для *p*-канала в 3–4 раза меньше.

плогового расширения, в результате чего при нагреве корпуса в матрице не возникает механических напряжений. К моделям матриц в керамических корпусах относятся: CCD60, CCD65, CCD97, CCD201-20, CCD30-11, CCD42-10, CCD42-40, CCD47-10, CCD55-20, CCD55-30, CCD62-06, CCD77-00, CCD230-42, CCD230-84, CCD39-01, CCD39-02, CCD47-20, CCD48-20, CCD57-10 и CCD67.

Среди керамических материалов следует выделить карбид кремния. Дело в том, что при криогенных температурах поверхность этого материала, в отличие от других, практически не испытывает деформаций и остается плоской. В связи с этим корпуса из SiC нашли широкое применение в устройствах, участвующих в космических программах. Модель матрицы в корпусе из карбида кремния — CCD231-84.

Проблема всех пассивных систем охлаждения заключается в неспособности понизить температуру менее температуры окружающей среды. В тех случаях, когда пассивного охлаждения недостаточно для нормальной работы устройства, применяются системы активного охлаждения. ПЗС-матрицы e2v с активным охлаждением представлены как в корпусах с элементом Пельтье (рис. 13), используемых для понижения температуры кристалла одноименный эффект, так и с азотным охлаждением. Эффект Пельтье заключается в том, что на стыке двух полупроводников *p*- и *n*-типа появляется контактная разность потенциалов. Если через контакт протекает электрический ток, то напряжение на контакте либо способствует прохождению заряда, либо препятствует ему, в зависимости от направления тока. В том случае, когда носители заряда ускоряются под действием контактной разности потенциалов, энергия, затрачиваемая на их ускорение, отбирается у вещества, что приводит к его охлаждению.

Модели матриц в корпусах с элементом Пельтье: CCD60, CCD65, CCD97 и CCD201-20.

### Радиационная защита

Сенсоры компании e2v используются в космосе, а значит, подвержены радиоактивному облучению. Радиационное излучение влияет на ПЗС-матрицы весьма сложным образом. В частности, оно вызывает увеличение темновых токов, вносит изменение в пороговое напряжение, уменьшает коэффициент передачи заряда и привносит случайный телеграфный (о нем чуть позже) сигнал.

Любая ПЗС-матрица на последней стадии производства проходит процесс отжига для пассивации оборванных связей. В этом процессе водород прикрепляется к оборванным связям в кремнии и его оксиде, что сильно уменьшает поверхностную составляющую темнового тока. Ионизирующее излучение выбивает из структуры этот водород, что приводит к повторному образованию оборванных связей. Данный процесс называется обратным отжигом. Для борьбы с этим эффектом, как правило, уменьшают толщину оксида (чем меньше толщина, тем меньше оборванных связей) и используют инвертированный режим, однако не во всех случаях это возможно, поскольку при этом сильно уменьшается глубина потенциальной ямы. Так как темновой ток экспоненциально зависит от температуры, то один из методов борьбы с ним — охлаждение жидким азотом. Существует и ряд других методик для уменьшения влияния этого эффекта.

Случайный телеграфный сигнал является следствием образования дефектов, благодаря которым в запрещенной зоне появляются дополнительные уровни — «ловушки». Этот эффект изучают уже много лет, однако пока единственным способом борьбы с ним является понижение рабочей температуры ПЗС-матрицы.

Ионизирующее излучение, помимо описанного выше, также может вызывать образование электрон-дырочных пар в слое оксида. Под действием приложенного напряжения

## Заключение

Продукция компании e2v уже многие годы определяет современный уровень ФПЗС. Постоянное совершенствование методов производства только закрепляет достигнутый успех. Многие из перечисленных технологий e2v уже давно используют-

ся в различных устройствах и приборах, как в космосе, так и на Земле, а некоторые еще только ждут своей очереди. Однако все они, безусловно, имеют огромные перспективы применения в области высококачественной фото- и видеосъемки, и, возможно, в недалеком будущем их станут использовать не только в дорогостоящих военных, науч-

ных и космических программах, но и в повседневной бытовой технике и обычных фотоаппаратах.

Цель данной работы — познакомить читателя с передовыми научными разработками в области ФПЗС и рассказать, над чем работают ученые и инженеры в лабораториях компании e2v. ■