

УДК 621.384.326.3

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕХНИКЕ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ**

*В. Г. Волков, Н. Ф. Кощавцев, В. И. Лелейкин, В. А. Чапнин*

Государственное унитарное дочернее предприятие «Специальное конструкторское бюро  
техники ночного видения», Москва, Россия

*Дано описание принципа действия твердотельного преобразователя изображения (ТПИ), а также прибора ночного видения на основе этого преобразователя. Предложены схема прибора и его принцип действия, характеристики и результаты экспериментов. Показаны перспективы повышения чувствительности твердотельных преобразователей изображения на базе структуры МДП—жидкий кристалл.*

В настоящее время наибольшее распространение получили приборы ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП), работающих в области спектра 0,4—0,9 мкм [1]. Однако для создания перспективных ПНВ наиболее целесообразно перейти к использованию рабочей области спектра 1,4—1,8 мкм. Это позволит в 1,4—1,5 раз повысить контраст в

изображении, создаваемом ПНВ, работать в условиях почти на два порядка большей естественной ночной освещенности, увеличить на 10—20 % обеспеченность освещенностью работу ПНВ ночью в течение всего года.

Для создания таких ПНВ оптимальным вариантом является применение ТПИ, работающих в области спектра 0,6—2 мкм и выполненных на базе структуры МДП—жидкий кристалл (МДП—ЖК). В отличие от ЭОП ТПИ — безвакуумный прибор, не требует высоковольтного питания, его устойчивость к воздействию световых помех на несколько порядков выше, чем у ЭОП.

В настоящее время созданы экспериментальные образцы таких ТПИ [2], имеющих следующие характеристики: чувствительность  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>, пространственное разрешение 25 штр/мм, диаметр чувствительной площади 20 мм, быстродействие — не хуже 20 мс, напряжение питания 10—20 В, габаритные размеры  $\varnothing$  70x15 мм, наработка на отказ 5000 ч. Такой ТПИ на базе структуры фоточувствительный полупроводник-жидкий кристалл (ФП—ЖК) позволяет в реальном масштабе времени преобразовывать исходное изображение. Конструкция структуры ФП—ЖК показана на рис. 1, где фоточувствительный слой фотопроводника (ФП) отделен от обоих прозрачных электродов слоями диэлектрика и жидкого кристалла (ЖК). Такие структуры работают при любой полярности напряжения питания. При создании изображения на входе структуры

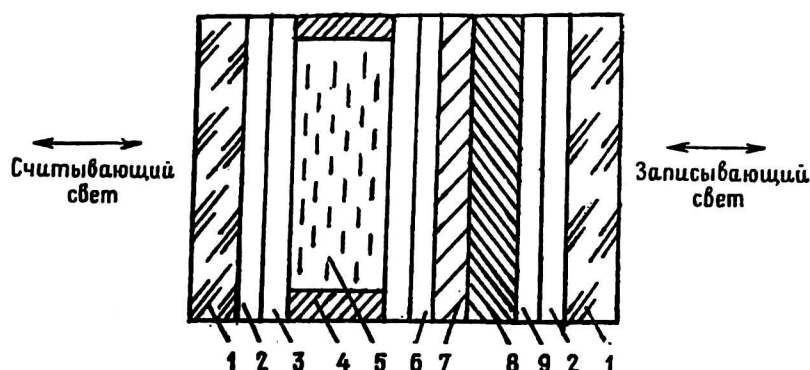


Рис. 1. Конструкция твердотельного преобразователя изображения:

- 1 — стеклянные подложки; 2 — прозрачные электроды; 3 — ориентирующий слой;
- 4 — прокладка; 5 — жидкий кристалл; 6 — диэлектрическое зеркало; 7 — блокирующий слой;
- 8 — фотопроводник; 9 — слой диэлектрика

в объеме высокоомного ФП формируется рельеф электрического поля, соответствующий рельефу освещенности ФП. Образующиеся за счет фотогенерации неравновесные свободные носители разводятся полем к границам ФП. При накоплении заряда, достаточного для полного экранирования объема ФП, происходит перераспределение напряжения между ФП и ЖК. При этом напряжение на ЖК увеличивается. Сформированный в структуре рельеф изображения хранится до тех пор, пока в ней протекают переходные процессы. Разрешающая способность структур ограничивается диффузным растеканием носителей заряда. После включения импульса напряжения накопленные на противоположных границах полупроводника электроны и дырки под действием поляризующего поля возвращаются в объем и рекомбинируют. Рельеф электрического поля, создаваемого под действием процессов фотогенерации носителей заряда при создании изображения на входе структуры, приводит к изменению электро-

оптических свойств ЖК и, как следствие этого — к пространственной модуляции считывающего излучения, отраженного от слоя диэлектрического зеркала, введенного в конструкцию ТПИ для устранения воздействия считывающего света на ФП. Для устранения влияния этого света, прошедшего через слой диэлектрического зеркала, между слоем ФП и зеркалом наносится "блокирующий" светопоглощающий слой (теллурид кадмия) с коэффициентом пропускания 0,0001. В качестве ФП используется полуизолирующий арсенид галлия, компенсированный хромом, ванадием и кислородом. Спектральная зависимость фоточувствительности структуры ТПИ на базе этого ФП изображена на рис. 2.

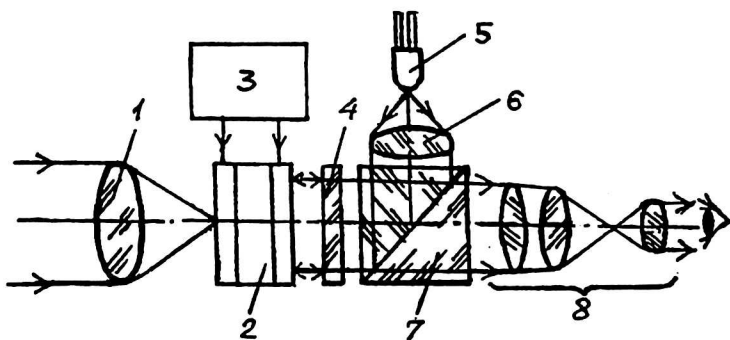


Рис. 2. Схема построения ПНВ на основе ТПИ:

- 1 — объектив; 2 — ТПИ; 3 — блок питания; 4 — поляризатор-анализатор; 5 — светодиод;  
6 — проекционный объектив; 7 — куб-призма; 8 — окулярная оптика

Светодиод (см. рис. 2) является источником считывающего излучения, которое коллимируется с помощью проекционного объектива и, отразившись от светоделительной гипотенузной грани куба-призмы, направляется к ЖК ТПИ. При этом с помощью поляризатора-анализатора (поляризационный фильтр ПФ 50) излучение поляризуется. Отраженное от ЖК излучение за счет вращения плоскости поляризации считывающего излучения при изменении напряжения на ЖК модулируется рельефом слоя ЖК, соответствующим рельефу изображения от объектива наблюдения и окружающего его фона в ФП ТПИ. Поворачивая вокруг оси ПНВ поляризатор-анализатор, можно менять контраст объекта на окружающем его фоне от отрицательного (темный объект на светлом фоне) до положительного (светлый объект на темном фоне) и наоборот.

Схема блока питания ТПИ изображена на рис. 3. Блок формирует меандр амплитудой 10—15 В. Частота меандра автоматически регулируется в зависимости от уровня внешней освещенности с помощью фотосопротивления ФС в пределах 100 Гц—10 кГц. Блок питается от напряжения постоянного тока 2,4—3 В. На рис. 4. показан внешний вид ТПИ и макета ПНВ на базе ТПИ. ПНВ имеет увеличение 2 крата, угол поля зрения 27 град, массу 0,6 кг, энергопотребление 0,15 Вт, разрешающую способность (с фильтром КС-19) 15 штр/мм при оптимальной освещенности. Цвет изображения определяется длиной волны источника считывающего излучения. В данном ПНВ используется светодиод ФЛ307Б зеленого цвета свечения.

Полевые испытания ПНВ показали, что при оптимальной освещенности ростовая фигура человека опознается на дальности 100 м, автомашина грузовая ЗИЛ 150 — на дальности 500 м, легковая автомашина "Жигули" — на дальности 300 м. Двенадцатиэтажные здания наблюдались на дальности до 3000 м. При наблюдении ярких объектов (излучения прожектора с силой света до 2 млн. кд,

лампы накаливания мощностью 100 Вт, установленных от ПНВ на расстоянии 300 и 3 м, соответственно) ТПИ локализует их изображение в виде светящихся точек, не мешающих процессу наблюдения. При визировании ПНВ в дневных условиях прямо на Солнце ТПИ вообще вычитает его изображение. Таким образом, экспериментально подтверждена способность ПНВ на базе ТПИ создавать изображение в условиях воздействия интенсивных световых помех (рис. 5).

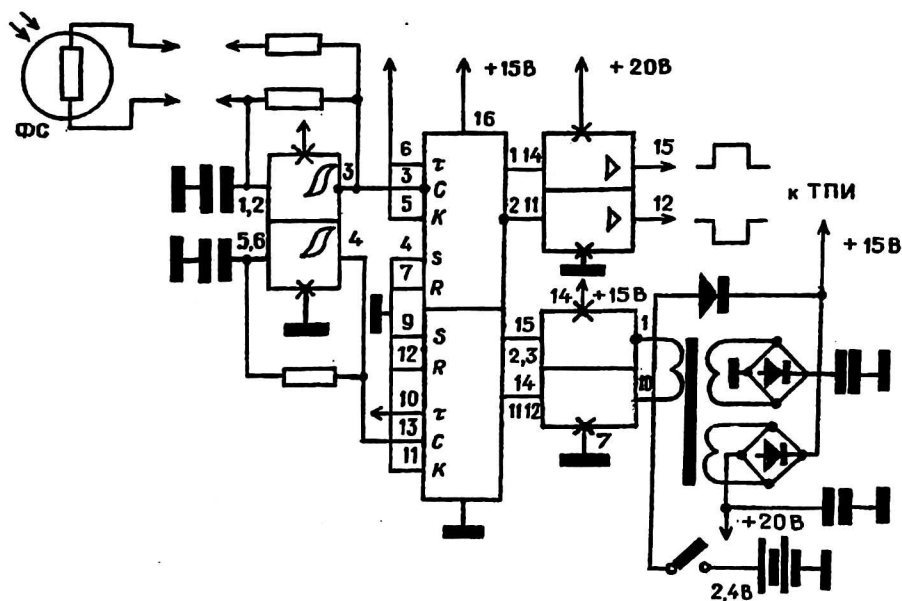


Рис. 3. Электрическая схема питания ТПИ

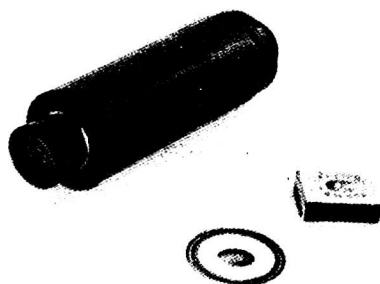


Рис. 4. Внешний вид макета ПНВ

Рассмотрим факторы, определяющие чувствительность ТПИ, и найдем пути ее повышения. В соответствии с подходом, продемонстрированным в работе [2], при подаче на ТПИ импульса питающего напряжения  $V$  оно распределяется в соответствии с геометрическими емкостями слоев ФП и ЖК (влиянием тонких диэлектрических слоев пренебрегаем):

$$V = E_{\text{ФП}} L_{\text{ФП}} + E_{\text{ЖК}}, \quad (1)$$

причем 
$$\Sigma_{\text{ПП}} \Sigma_0 E_{\text{ФП}} = -q\sigma + \Sigma_{\text{ЖК}} \Sigma_0 E_{\text{ЖК}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{ФП}} = \Sigma_{\text{ЖК}} V L_{\text{ФП}} (\Sigma_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} + \Sigma_{\text{ЖК}} L_{\text{ФП}})^{-1} - q\sigma L_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} (\Sigma_0 (\Sigma_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} + \Sigma_{\text{ЖК}} L_{\text{ФП}}))^{-1}, \quad (3)$$

где  $q$  — заряд электрона;

$\Sigma_{\text{ФП}}$ ,  $\Sigma_{\text{ЖК}}$ ,  $\Sigma_0$  — относительные диэлектрические проницаемости слоев ФП и ЖК и единицы объема, соответственно;

$L_{\text{ФП}}$ ,  $L_{\text{ЖК}}$  — толщины слоев ФП и ЖК, соответственно;

$V_{\text{ФП}}$ ,  $V_{\text{ЖК}}$  — электрическое напряжение на ФП и ЖК, соответственно;

$E_{\text{ФП}}$ ,  $E_{\text{ЖК}}$  — электрическая напряженность слоя в ФП и в ЖК, соответственно;

$\sigma$  — поверхностная плотность зарядов на границе ФП—ЖК, включая равновесные, фото- и термогенерированные носители заряда.

Электрическое поле в ФП и, следовательно, фоточувствительность ТПИ реализуются при выполнении условия:

$$q\sigma < \Sigma_0 \Sigma_{\text{ЖК}} E_{\text{ЖК}}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что длительность импульса питающего напряжения  $\tau_{\text{и}}$  должна быть меньше времени экранирования электрического поля:

$$\tau_{\text{и}} < (\Sigma_0 \Sigma_{\text{ФП}} + \Sigma_0 \Sigma_{\text{ЖК}} L_{\text{ФП}} (2L_{\text{ЖК}})^{-4}) (V - V_{\text{ЖК}}) (qG_0 L_{\text{ФП}}^2)^{-1}, \quad (5)$$

где  $G_0$  — скорость термической генерации в единице объема ФП.

Следует отметить, что ЖК ведет себя как типичный диэлектрик (что определяет справедливость данного подхода) при временах, меньших времени  $\tau_{\text{м}}$  диэлектрической релаксации, т. е. необходимо соблюдение соотношения:

$$\tau_{\text{и}} \tau_{\text{м}} \leq \Sigma_0 \Sigma_{\text{ЖК}} \rho_{\text{ЖК}}. \quad (6)$$

Это ограничение определяется тем, что в интервале  $\tau_{\text{м}}$  происходит такое перераспределение электрических зарядов, при котором за время, превышающее  $\tau_{\text{м}}$ , в структуре ФП—ЖК устанавливается режим сквозного тока.

С учетом указанных ограничений изменение напряжения  $\Delta U_{\text{ЖК}}$  на слое ЖК при освещенности  $E$  фоточувствительного полупроводникового элемента (ФЧЭ) имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ЖК}} &= q\beta E \tau_{\text{э}} L_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} (h_{\text{в}} \Sigma_0 (\Sigma_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} + \Sigma_{\text{ЖК}} L_{\text{ФП}}))^{-1} = \\ &= q\beta E \tau_{\text{э}} (h_{\text{в}} (C_{\text{ФП}} + C_{\text{ЖК}}))^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $E$  — освещенность ФП ФЧЭ;

$\tau_{\text{э}}$  — время экспозиции;

$h_{\text{в}}$  — средняя энергия кванта падающего излучения;

$\beta$  — квантовая эффективность ФП ПЧЭ;

$\rho_{\text{ЖК}}$  — проводимость ЖК.

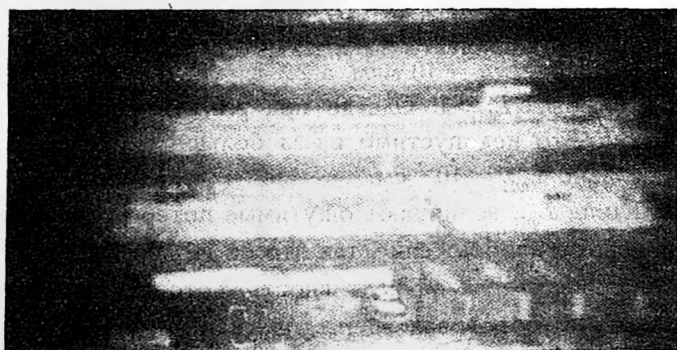
Анализ соотношения (7) с учетом реально достижимых значений полувольтного напряжения ЖК, необходимых толщин ФП ФЧЭ и ЖК, позволяет оценить предельные значения чувствительности ТПИ на основе структуры ФП—ЖК. Для этого соотношение (7) запишем в виде:

$$\begin{aligned} H &= \Delta U_{\text{ЖК}} (C_{\text{ФП}} + C_{\text{ЖК}}) h_{\text{в}} (q\beta)^{-1} = \\ &= \Delta U_{\text{ЖК}} \Sigma_0 (\Sigma_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} + \Sigma_{\text{ЖК}} L_{\text{ФП}}) h_{\text{в}} (L_{\text{ФП}} L_{\text{ЖК}} q\beta)^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $H = \tau_{\text{э}} E$  — световая экспозиция.

Оценка возможности повышения чувствительности ТПИ сводится к оптимизации параметров слоев ТПИ и в первую очередь ЖК.

Из соотношения (8) следует, что для уменьшения пороговой плотности мощности необходим ЖК с минимальным полуволновым напряжением. В настоящее время оно достигает значения менее 0,1 В. В принципе его можно понизить до уровня менее 0,01 В. Однако это вызывает очень жесткие требования к однородности ФП ФЧЭ. Для практической реализации ЖК с таким низким значением полуволнового напряжения необходимо, чтобы неоднородности распределения напряжения по поверхности и по толщине ФП (ФЧЭ) ТПИ были существенно меньше. Так, при реальных напряжениях питания ТПИ около 10 В использование ЖК с полуволновым напряжением 0,01 В требует однородности по сопротивлению ФП ФЧЭ  $\Delta\rho/\rho$  выше, чем 0,001. В противном случае возникающие неоднородности распределения напряжения исказят изображение. Однако выращивание высокоомных материалов для ТПИ с такими высокими требованиями к неоднородности удельного сопротивления (выше 0,1 %) является нерешенной до сих пор сложнейшей технологической задачей.



б

*Рис. 5. Характер изображения, наблюдаемый в макет ПНВ на базе ТПИ в сравнении в аналогичном изображением, полученным непосредственным фотографированием в дневных условиях:*

а — гаражи и автомашины; б — то же, при наблюдении в макет ПНВ

Возможности выбора ФП материала для изготовления ФЧЭ ограничены. Использование узкозонных материалов (ширина запрещенной зоны  $E_g < 1$  эВ) для работы в области спектра 1,1—2 мкм исключено из-за низкого удельного сопро-

тивления таких материалов при  $T = 273$  К (рабочая температура ЖК). Поэтому возможно применение только относительно широкозонных ФП с подходящим по энергии активации локальным уровнем. Одним из таких наиболее изученных к настоящему времени материалов является арсенид галлия полуизолирующий (АГП) с глубоким энергетическим уровнем вблизи середины запрещенной зоны. Природа этого уровня окончательно не установлена, но методика получения известна [2]. Принципиальная сложность использования АГП связана с довольно низким коэффициентом поглощения  $\alpha$ . В работе [2] достигнуто его значение всего несколько  $\text{см}^{-1}$ . С помощью сложной технологии удалось добиться  $\alpha = 10\text{--}12 \text{ см}^{-1}$ . Его максимальное значение  $25\text{--}30 \text{ см}^{-1}$ . Однако повышение  $\alpha$  (степени легирования) в АГП существенно затрудняет получение достаточно высокоомного и однородного материала. Кроме того, в нем возникает проблема ловушек и связанное с ней явление запоминания изображения на время до нескольких секунд и более.

Чувствительность ТПИ на базе ФП—ЖК ограничивает также фотогенерация неравновесных носителей заряда за счет подсвета внешним считывающим излучением. Оно находится в области спектральной чувствительности ФП ФЧЭ ТПИ, а диэлектрическое зеркало на границе ФП—ЖК может пропускать до 1 % излучения. Использование монохроматического источника считывания и уменьшение пропускания диэлектрического зеркала до предельных значений, при которых генерация неравновесных носителей заряда меньше величин, определяемых полезным сигналом, позволяет устранить этот недостаток.

Следующим фактором, ограничивающим чувствительность ТПИ, является термогенерация носителей заряда. При использовании в ТПИ относительно узкозонных объемных однослойных ФП ФЧЭ чувствительность ТПИ может уменьшаться на несколько порядков. Термогенерацию можно существенно снизить за счет использования гетероструктур либо квантовых структур с тонким ФП слоем относительно узкозонного полупроводникового материала. Последний будет определять низкий уровень термогенерации неравновесных носителей заряда в структуре.

Рассмотрев факторы, уменьшающие пороговую чувствительность ТПИ данного типа, можно оценить предельное ее значение в рамках рассмотренной модели, используя реальные параметры ФП—ЖК. К настоящему времени в ТПИ возможно применение ЖК с величиной полуволнового напряжения  $0,01\text{--}0,1$  В. При этом длина ЖК слоя  $L_{\text{жк}} = 10$  мкм, а  $\Sigma\text{ЖК} = 6$ . В этом случае величина  $L_{\text{фп}}$  выбирается такой, чтобы  $\alpha L_{\text{фп}} > 1$ . Однако при реально достигнутых  $\alpha \approx 10 \text{ см}^{-1}$  имеем  $L_{\text{фп}} = 0,1$  см. Это недопустимо из-за большого уровня термогенерации, так что обычно реально  $L_{\text{фп}} = 10^{-2}$  см.

При такой величине  $L_{\text{фп}}$  возникают ощутимые потери полезного оптического сигнала, формирующего изображение, так что он не превышает 20 %. Предполагая, что внутренняя квантовая эффективность фотопроводимости около 1, на основе соотношения (8) пороговая энергетическая экспозиция ТПИ составляет  $10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup>. С учетом времени накопления  $0,01\text{--}0,001$  с верхний предел чувствительности можно считать равным  $10^{-9}\div 10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Достижение этого предела связано с решением комплекса отмеченных выше проблем. Современные ЭОП имеют пороговую чувствительность  $10^{-11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако отмеченные выше преимущества спектрального диапазона ТПИ позволяют компенсировать их меньшую пороговую чувствительность по сравнению с ЭОП. С учетом изложенного существуют реальные возможности построения перспективных ПНВ на базе ТПИ.

### Литература

1. Волков В. Г. Современное состояние развития приборов ночного видения: Обзор по материалам отечественной и зарубежной печати за 1978—1994 гг. — М.: НТЦ Информтехника, 1994. — 105 с.
2. Александрович С. В., Антонов В. А., Григорьев В. А., Кошавев Н. Ф., Компанец И. Н., Парфенов А. В., Саввина Р. М., Савельев В. А. Преобразование изображений ИК-диапазона (длина волны свыше 1,1 мкм) фоточувствительной жидкокристаллической структурой // Краткие сообщения по физике, 1992. № 7, 8. С. 3—8.

## THE USING OF SOLID STATE IMAGE CONVERTERS IN THE NIGHT VISION TECHNIQUE

*V. G. Volcov, N. F. Koshavtsev, V. I. Leleicin, V. A. Tshapnin*  
Special Design Office of Night Vision Technologie (SDO of NVT), Moscow, Russia

*This paper describes the principle of working of the solid state image converters and the night vision device on base this converter too. There is suggested the scheme of dtvis. There are described its operation, pervormanse and results of experiments. There are showed the properties of increasing sensitive of solid state image on the base structure MOS — liquid cristal.*