

06

© 1990 г

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП СТРУКТУРЫ ПРИ ПРЯМОМ КОНТАКТЕ КРЕМНИЯ С ЖИДКИМ КРИСТАЛЛОМ

Л. К. Вистинь, А. В. Хаимов-Мальков

Исследовались структуры, в которых жидкий кристалл контактировал непосредственно с поверхностью кремния, что давало возможность на границе их раздела формировать двойной электрический слой. Прямой контакт для данной структуры позволил получить новые экспериментальные зависимости пороговой интенсивности света, которая вызывает возникновение в слое жидкого кристалла состояния, рассеивающего свет (эффект ДРС), от величины запирающего напряжения и толщины слоя жидкого кристалла, а также зависимость величины фототока от интенсивности падающего на структуру света для структур с различными толщинами слоев жидкого кристалла и вольт-амперную характеристику. Показано, что чем выше запирающее напряжение и чем больше толщина слоя жидкого кристалла, тем более слабые световые потоки способна записывать структура.

В данной работе приводятся результаты исследований электрооптических свойств МДП структуры типа низкоомный полупроводник  $P$ -типа—жидкий кристалл—прозрачный электрод  $\text{SnO}_2$ , отличающейся от известных рядом признаков. Во-первых, применялся более низкоомный кремний с удельным сопротивлением  $10.40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Низкоомный кремний, который упоминается в других работах [1, 2], имел сопротивление  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Во-вторых, между кремнием и слоем жидкого кристалла отсутствовала изолирующая прокладка, кремний имел прямой контакт с жидким кристаллом. Прямой контакт кремния с жидким кристаллом способствовал образованию двойного электрического слоя на границе раздела ПП—ЖК, благодаря чему структура приобретала фоточувствительность, нелинейные электрические свойства, повышенную проводимость. Названные свойства наблюдались только в том случае, если в качестве подложки использовался кремний  $P$ -типа. Нелинейные электрооптические свойства структуры позволяли исследовать ее в рамках пространственно-временного модулятора света. Но в этом случае в отличие от известных структур структура работала не в режиме обеднения, а в фотодиодном режиме. Фотодиодный режим не требовал применения переменного напряжения. Структура могла функционировать при постоянном напряжении смещения, что давало определенное преимущество: не требовалась подстройка по частоте. Исследовалась зависимость минимальной пороговой интенсивности света  $J_{\text{п}}$ , которая при падении на структуру вызывала в слое ЖК изменение прозрачности, от толщины слоя ЖК  $h$  и от напряжения смещения  $V_c$ , подаваемого на структуру.

Экспериментальная установка состояла из оптической скамьи, на которой закреплялся источник света с набором нейтральных оптических фильтров—ослабителей интенсивности света. Исследуемая ячейка представляла собой пластину кремния с калиброванными прокладками из фторопласта, задающими величину зазора между стеклом с прозрачным электродом из  $\text{SnO}_2$  и кремнием. В зазоре между Si и  $\text{SnO}_2$  находился слой жидкого кристалла. Источники света были откалиброваны по интенсивности света. Интенсивность излучения управлялась током питания лампы. Интенсивность излучения лазера изменялась от максимальной до минимальной установкой соответствующих ослабителей

с калиброванной оптической плотностью. Напряжение в диапазоне от 0 до 200 В подавалось на структуру от источника постоянного тока. Electroдами служили пластины кремния и пленки  $\text{SnO}_2$ . Наблюдение за возникновением рассеяния света слоем ЖК велось визуально и одновременно регистрировалось фотомножителем по изменению интенсивности отраженного от поверхности кремния света. МДИИ структура имела как обычную планарную геометрию, так и необычную с клинообразным слоем ЖК. В клинообразной ячейке при освещении ее пороговой интенсивностью света эффект ДРС возникал сначала в толстой части клина в виде светлой рассеивающей полосы. При увеличении интенсивности света граница полосы перемещалась в тонкую часть клина, непрерывно увеличивая площадь жидкого кристалла, рассеивающую свет. Измерялось увеличение длины рассеивающей полосы с увеличением интенсивности падающего

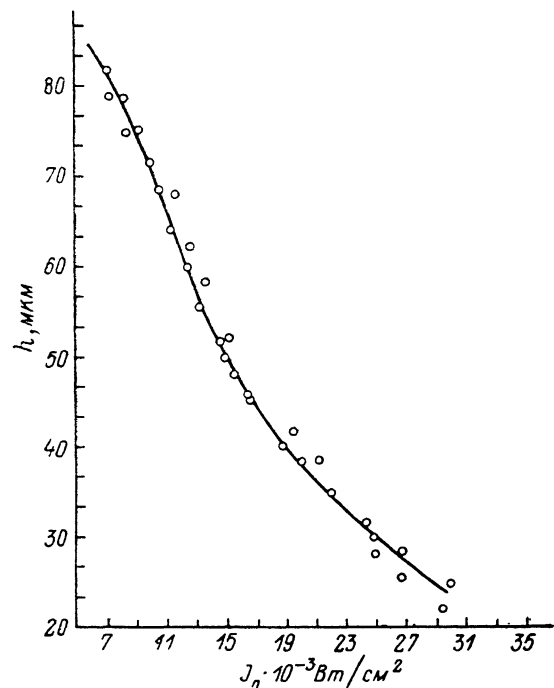


Рис. 1. Зависимость пороговой интенсивности света  $J_p$  от толщины слоя  $h$  жидкого кристалла.

составляет 5—8 В. Как видим, в случае образования двойного слоя темновое пороговое напряжение  $V_p$  эффекта ДРС возрастает до 100 В. При снижении темнового напряжения смещения ниже 100 В эффект рассеяния света исчезает.

Эксперимент состоял в следующем. Сначала темновое напряжение снижалось до исчезновения ДРС и фиксировалось. Затем структура освещалась светом с длиной волны  $\lambda = 0.63$  мкм, при этом подбиралась минимальная интенсивность света, которая могла снова вызвать появление ДРС в слое ЖК. Регистрация появления ДРС велась на длине волны света  $\lambda = 0.45$  мкм, к которой структура была нефоточувствительна. После измерения пороговой интенсивности света и соответствующего напряжения смещения напряжение опять уменьшалось до исчезновения ДРС. Затем интенсивность света снова увеличивалась до возникновения ДРС, фиксировалось напряжение, и т. д. Критические величины напряжения смещения и пороговой интенсивности света, соответствующие образованию ДРС, показаны на рис. 2, откуда видно, что чем большим темновым напряжением смещения обладает структура, тем более слабые световые интенсивности она способна визуализировать и регистрировать.

При малых напряжениях смещения до 25 В запирающее напряжение малое, следовательно, малое и разделяющее заряды электрическое поле. Поэтому, чтобы возник эффект ДРС, надо увеличивать ток фотогенерации и соответственно

на клин света и затем рассчитывалась зависимость пороговой интенсивности света  $J_p$  от толщины слоя жидкого кристалла  $h$  (рис. 1). Зависимость  $J_p$  от  $h$  проверялась на плоскопараллельных ячейках, имеющих различную толщину. Оба метода измерения дали одинаковый результат. Зависимость пороговой интенсивности света  $J_p$  от напряжения смещения  $V_c$ , подаваемого на структуру, снималась на плоскопараллельных ячейках. Предварительно на границе раздела кремний—жидкий кристалл формировался двойной электрический слой. Темновое напряжение смещения, при котором отсутствовал эффект ДРС и практически отсутствовал электрический ток через слой ЖК толщиной 15 мкм, достигало 100 В. При более высоком напряжении эффект ДРС возникал и в темноте. Напомним, что минимальное напряжение, при котором ЖК начинает сильно рассеивать падающий свет, для обычных металлических электродов

интенсивности падающего на структуру света. При более высоких напряжениях, как видно из рис. 2, интенсивность света, вызывающая эффект ДРС, быстро убывает и стремится к нулю. В этом случае благодаря высокому напряжению создается сильное электрическое поле в обедненном слое. Оно, с одной стороны, эффективно разделяет фотогенерированные носители, с другой стороны, падение напряжения на барьере достигает большой величины, достаточно значительно уменьшить сопротивление барьера за счет освещения, чтобы напряжение перераспределилось и достигло на слое ЖК величины, необходимой для возникновения ДРС. Оба механизма способствуют высокой фоточувствительности структуры.

Качественно результаты эксперимента можно объяснить в простейшем случае, не вдаваясь в причины формирования потенциального барьера. Известно, что на границе раздела слоев с различной диэлектрической проницаемостью и электропроводностью накапливается электрический заряд. В соответствии с условием непрерывности токов, проходящих через слой полупроводника и жидкого кристалла, токи равны и складываются из токов проводимости

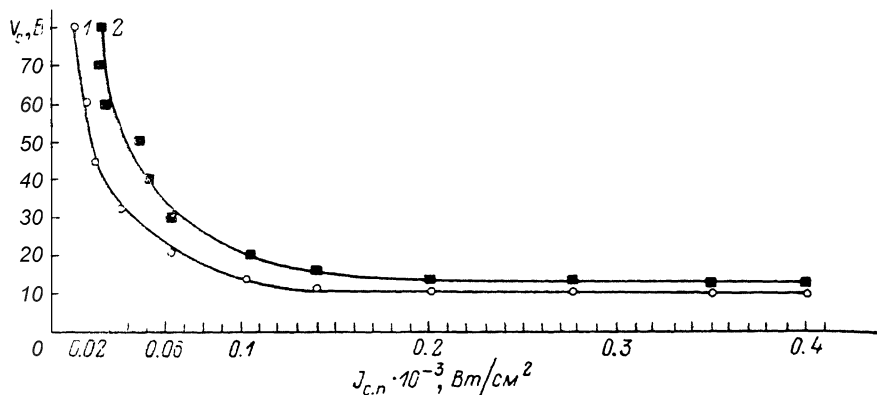


Рис. 2. Зависимость пороговой интенсивности света  $J_{п}$  от напряжения смещения  $V$ , подаваемого на структуру.

1 — через  $\text{SnO}_2$ , 2 — через  $\text{Si}$ .

и токов смещения. Учитывая, что в эксперименте использовались постоянные токи, токами смещения можно пренебречь и для плотности тока  $j$  записать

$$j = \sigma_{\text{фп}} E_{\text{фп}} = \sigma_{\text{жк}} E_{\text{жк}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $E$  — соответственно проводимость и напряженность электрического поля в ПП и ЖК.

Отсюда

$$\sigma_{\text{фп}} = \frac{\sigma_{\text{жк}} E_{\text{жк}}}{E_{\text{пп}}} = \frac{\sigma_{\text{жк}} \cdot h_{\text{пп}} \cdot V_{\text{п}}}{V_0 h_{\text{жк}}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{п}}$  — напряжение на слое ЖК, соответствующее образованию ДРС, а  $V_0$  — напряжение на ПП.

Учитывая, что характер зависимости проводимости структуры ПП—ЖК от интенсивности света на большем участке кривой рис. 3 аппроксимируется выражением  $\sigma_{\text{фп}} \sim k J_{c,п}$ , уравнение (2) можно записать

$$J_{c,п} = \frac{\sigma_{\text{жк}} h_{\text{пп}} V_{\text{п}}}{k V_0 \cdot h_{\text{жк}}}, \quad (3)$$

где  $J_{c,п}$  — пороговая интенсивность света, которая вызывает ДРС в слое ЖК.

Уравнение (3) в общих чертах правильно описывает характер экспериментальных зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3. Если использовать вместо эффекта ДРС другие электрооптические эффекты, например эффект Фредерикса или линейный электрооптический эффект, и сегнетоэлектрические жидкие кристаллы, для которых пороговое напряжение составляет 0.1—0.01 В, то макси-

мальная чувствительность структуры к свету может быть повышена на три порядка по сравнению с кривой, полученной на эффекте ДРС (рис. 2).

Рассмотрим процессы, проходящие в структуре. При подаче постоянного напряжения на ячейку происходит три процесса. Первый — разделение заря-

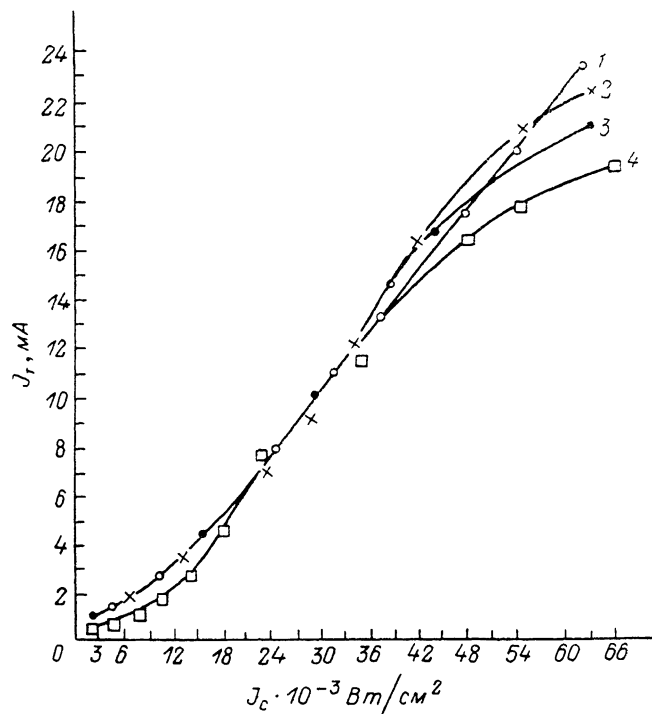


Рис. 3. Зависимость фототока от интенсивности света для различных толщин жидкокристаллического слоя  $h$ .

1 — 3, 2 — 10, 3 — 25, 4 — 110 мкм.

дов в кремнии и его обеднение. Второй — инжекция зарядов из кремния в ЖК и образование в последнем объемного заряда. Третий — образование на границе раздела ЖК—Si—P-типа гетеропереход. Последнее приводит к тому, что

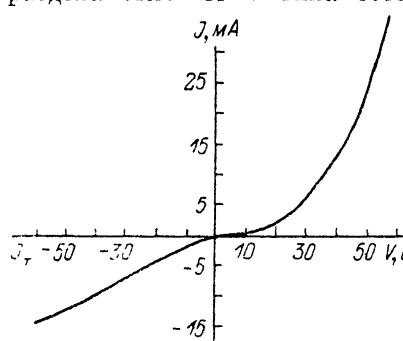


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика структуры.

Толщина жидкого кристалла  $h=5$  мкм,  $J_T$  — темновой,  $J_C$  — световой токи.

структура приобретает свойства, характерные для фотодиода. В ней наблюдается типичная вольт-амперная характеристика (рис. 4). Как показал эксперимент [3, 4], структура работает в фотодиодном и вентильном режимах. Сопротивление барьера в прямом направлении мало, сопротивление полупроводника также мало ( $R=40$  Ом·см), следовательно, все напряжение падает на слой жидкого кристалла. Сопротивление слоя ЖК, определенное по линейному участку ВАХ (рис. 4), при толщине слоя ЖК 15 мкм составило  $R=2 \times 10^3$  Ом. Отметим одну важную особенность в поведении жидкого кристалла: в нем не возникает никаких электрооптических эффектов, хотя к структуре прило-

жено напряжение, в несколько раз превышающее пороговое напряжение жидкого кристалла, при котором в последнем образуется рассеивающая свет структура. Несмотря на наличие высокого напряжения, он остается совершенно прозрачным. Тот факт, что ЖК не изменяет своей прозрачности под действием электрического поля связан с крайне неравномерным распределением напряжения

до толщины слоя жидкого кристалла. Основное падение напряжения приходится на область объемного заряда, а на остальной толщине слоя ЖК он не достигает пороговой величины  $V_p$ , необходимой для возникновения ДРС. Это объяснение подтверждается в эксперименте с зондом, описанном в работе [4], где показано, что напряжение падает в тонкой приэлектродной области, а на остальной толщине слоя ЖК имеет величину ниже порогового значения. При обратном напряжении практически все напряжение падает на барьере, так как сопротивление барьера, согласно ВАХ рис. 4, оказывается равным  $15 \cdot 10^4$  Ом. Электрооптические эффекты в темновом режиме поэтому также не наблюдаются. При освещении структуры светом, безразлично с какой стороны ЖК (рис. 2, кривая 1) или кремния (кривая 2), свет, проходя тот или другой слой, соответственно поглощается на границе раздела ПП—ЖК и вызывает рекомбинацию носителей заряда. Рекомбинация зарядов в свою очередь сопровождается уменьшением сопротивления барьера. Это приводит к возрастанию тока при увеличении интенсивности света и к перераспределению и выравниванию напряжения на слое ЖК. Напряжение на слое ЖК достигает пороговой величины  $V_p$ . Слой ЖК изменяет прозрачность при определенной величине интенсивности света  $J_p$ , падающего на структуру.

В заключение отметим, что полученные нами структуры более двух лет работали без изменения своих электрооптических характеристик. Не имеется оснований считать, что они не могут работать большие сроки. Кроме того, тот факт, что величина тока практически не зависит от толщины слоя жидкого кристалла в пределах 5—110 мкм (рис. 3) лишней раз подтверждает, что все процессы происходят на границе раздела ЖК—Si и объемное сопротивление слоя ЖК мал.

#### Список литературы

- [1] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [2] Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник-диэлектрик. М.: Наука, 1987. 175 с.
- [3] Вистинь Л. К., Семилетов С. А., Хаимов-Мальков А. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 8. С. 456—459.
- [4] Вистинь Л. К., Семилетов С. А., Хаимов-Мальков А. В., Яковенко С. С. // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 1. С. 94—97.

Институт кристаллографии АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
10 ноября 1988 г.

В окончательной редакции  
30 января 1989 г.