

©1995 г.

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ В КРИСТАЛЛАХ CdS ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*И.А. Дроздова, Б.Е. Ембергенов, Н.Е. Корсунская,  
И.В. Маркевич, А.Ф. Сингаевский*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,  
151028, Киев, Украина  
(Получена 8 августа 1994 г. Принята к печати 5 сентября 1994 г.)

Показано, что необходимым условием формирования проводящих каналов в высокоомных кристаллах CdS является неоднородность кристалла по сопротивлению, а именно наличие в нем низкоомных областей, разделенных узкими высокоомными промежутками. При приложении к кристаллу достаточно высокого напряжения через высокоомные промежутки протекает ток двойной инжекции и сопротивление их резко уменьшается.

### 1. Вступление

Ранее было обнаружено, что в высокоомных фоточувствительных кристаллах CdS под действием внешнего электрического поля вдоль направления поля могут формироваться проводящие каналы (ПК), вследствие чего проводимость образца вдоль этого направления становится намного больше его проводимости в поперечном направлении. После отключения поля ПК постепенно рассасываются и кристалл вновь становится изотропным по проводимости [1]. Было показано, что необходимым условием формирования ПК является наличие подвижных доноров [1]. Вместе с тем во многих случаях в кристаллах, содержащих подвижные доноры, ПК не образуются.

Как показывают приведенные далее результаты, вторым необходимым условием формирования ПК является изначальная неоднородность кристалла по сопротивлению, а именно наличие в нем низкоомных областей, разделенных узкими высокоомными промежутками.

## 2. Эксперимент

Образцы представляли собой объемные, высокоомные, фоточувствительные кристаллы CdS, выращенные методом сублимации [2]. Для измерений выбирались такие кристаллы, в которых образование ПК и их разрушение после отключения поля происходит достаточно медленно [1], чтобы за время, необходимое для измерений, состояние образца практически не изменялось. Измерялись вольт-амперные, люкс-амперные и амплитудно-частотные характеристики тока до и после формирования ПК.

2.1. *Вольт-амперные характеристики (ВАХ).* Чтобы избежать влияния приконтактных областей, в том числе высокоомного прианодного слоя, образующегося вследствие дрейфа подвижных дефектов под действием приложенного к образцу поля [3,4], ВАХ измерялись зондовым методом. На образцы, выколотые из слитка, размерами примерно  $5 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ , наносились электроды из расплавленного In, как показано на вставке к рис. 1. К электродам 1, 2 прикладывалось напряжение  $U$ , измерялся ток через образец  $I$  и падение напряжения между зондами 3, 4 ( $U_{\text{пр}}$ ), а затем строилась зависимость  $I \sim f(U_{\text{пр}})$ .

Типичные ВАХ темнового тока и фототока до и после формирования ПК приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, в исходном кристалле темновой ток резко растет с увеличением напряжения (кривая 1), при этом для разных кристаллов наклон ВАХ  $\alpha = 4 \div 9$ . При

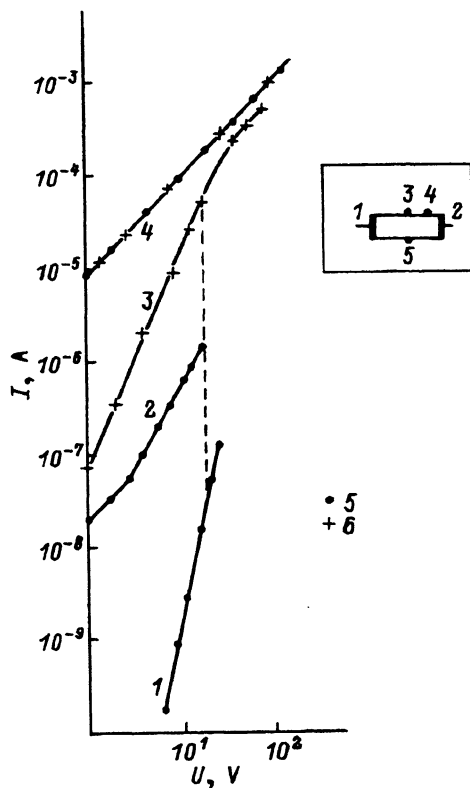


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика для одного из образцов, измеренная до (5) и после (6) формирования ПК, в темноте (1,3), при слабом освещении (2) и при интенсивной подсветке (4). Пунктир — рост тока со временем в результате формирования ПК. На вставке — схема нанесения электродов на образец.

слабой подсветке вначале наблюдается омический участок, а затем сверхлинейность с  $\alpha \approx 2$  (кривая 2). Такой вид ВАХ характерен для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) в случае частично (кривая 1) и полностью (кривая 2) заполненных ловушек [5]. Как известно, в высокоомном CdS ТОПЗ наблюдается обычно при полях  $E \geq 10^3$  В/см [5]. В исследуемых кристаллах характерная для ТОПЗ ВАХ имеет место при среднем поле в образце  $E = (1 \div 10)$  В/см. Можно думать поэтому, что образцы неоднородны и содержат тонкие высокоомные прослойки, суммарная толщина которых в направлении поля не превышает  $(10^{-3} \div 10^{-2})$  см на 1 см длины образца.

В процессе измерения ВАХ при достижении некоторого напряжения, лежащего для разных образцов в пределах  $(10 \div 100)$  В, наблюдается рост тока через образец со временем, что связано с формированием ПК [1]. После окончания этого процесса ВАХ изменяется: вначале она сверхлинейна с  $\alpha = 2.5 \div 3$ , а затем (с ростом  $U$ ) становится линейной, при этом проводимость существенно превышает первоначальную (рис. 1, кривая 3). В то же время при изменении полярности напряжения проводимость образца оказывается очень малой и при достаточно большом  $U$  снова начинается формирование ПК уже в другом направлении. Этот процесс при той и другой полярности напряжения может быть проведен на одном и том же кристалле многократно. При интенсивной освещенности ( $L \approx 10^3$  лк) сформированные в темноте или при слабой подсветке ПК не проявляются: кристалл оказывается изотропным по проводимости и ВАХ фототока, измеренные до и после формирования ПК, совпадают (рис. 1, кривая 4). Образование ПК при интенсивной подсветке не происходит.

Вид темновой ВАХ после формирования ПК можно объяснить протеканием токов двойной инжекции [6] в высокоомных прослойках, при этом на линейном участке сопротивление образца ограничивается, по-видимому, сопротивлением расположенных между ними более низкоомных включений. Известно, что протекание токов, двойной инжекции в кристаллах CdS обычно сопровождается люминесценцией [6-8]. В исследуемых кристаллах видимая глазом люминесценция наблюдалась только при низких температурах. Поэтому, чтобы проверить, действительно ли после формирования ПК в образце имеют место токи двойной инжекции, мы охлаждали кристалл до 80 К. Оказалось, что ВАХ, измеренная в темноте при этой температуре, имеет вид, подобный ВАХ при 300 К (рис. 1, кривая 3), при этом в конце сверхлинейного участка появляется свечение, которое становится весьма интенсивным на линейном участке. Отметим, что темновая проводимость в состоянии с ПК на линейном участке для большинства образцов практически не зависит от температуры в области  $(300 \div 80)$  К.

*2.2. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).* АЧХ темнового тока и фототока измерялись в диапазоне частот  $(10^2 - 10^6)$  Гц при напряжении 10 В как вдоль (электроды 1, 2), так и поперек (электроды 3, 5) образцов до и после формирования ПК.

Типичные АЧХ представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, с увеличением частоты приложенного напряжения ток через образец сначала возрастает, а затем выходит на полку, для большинства образцов — в области  $(10^5 - 10^6)$  Гц. Подсветка приводит к росту тока

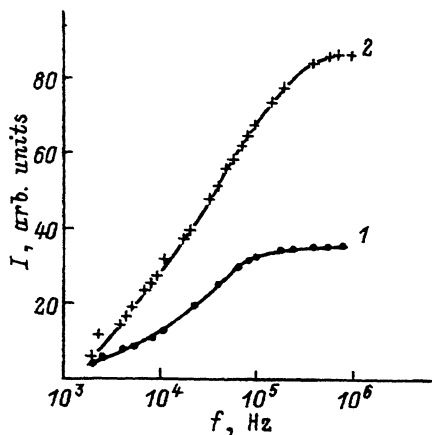


Рис. 2. АЧХ фототока, измеренная при 300 К при слабом освещении образца в исходном состоянии (1) и после формирования канала (2).

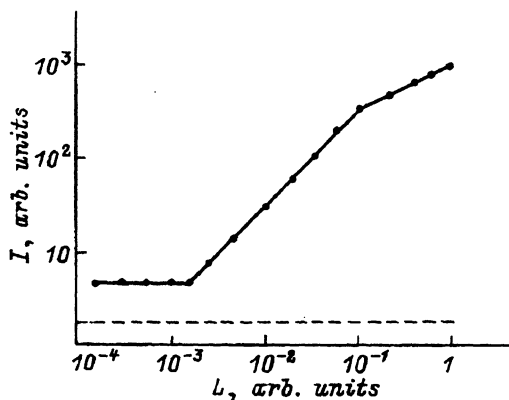


Рис. 3. Люкс-амперная характеристика для одного из образцов, измеренная при 300 К на переменном токе ( $f = 1$  МГц). Пунктир — уровень темнового сигнала.

на высокочастотной полке и сдвигу начала полки в область более низких частот. Эти изменения увеличиваются с ростом освещенности  $L$ . При достаточно больших  $L \approx 10^3$  лк полка начинается с самых низких из используемых частот.

Описанный вид АЧХ соответствует эквивалентной схеме, состоящей из последовательно включенных емкостей и омических сопротивлений. Роль первых могут играть высокоомные промежутки, роль вторых — низкоомные участки образца. В этом случае величина сигнала на полке АЧХ в темноте определяется равновесной проводимостью низкоомных участков. Эта величина практически не зависит от температуры в области (300–80) К, что согласуется с отсутствием температурной зависимости тока на линейном участке ВАХ после формирования ПК. Отсутствие частотной зависимости фототока при больших  $L$  можно объяснить тем, что фотопроводимость высокоомных промежутков становится сравнимой с проводимостью низкоомных областей.

На рис. 3 приведена люкс-амперная характеристика (ЛАХ) фототока, измеренная на высокочастотной полке АЧХ. Как видно из рисунка, при малых  $L$  сигнал не зависит от интенсивности света, хотя и превышает темновое значение. В области средних освещенностей ЛАХ линейна, а при дальнейшем увеличении  $L$  становится сублинейной, как это обычно имеет место в высокоомных фоточувствительных кристаллах CdS [9]. После выключения света наблюдается медленная (в течение нескольких минут при 300 К) релаксация сигнала до его темнового значения. Естественно считать, что эта релаксация обусловлена остаточной проводимостью, которая связана с вытеканием электронов из низкоомных участков в высокоомные через разделяющий их энергетический барьер [10]. Об этом же свидетельствует независимость величины сигнала от освещенности при малых  $L$  (рис. 3) [10].

После формирования каналов наклон зависимости  $I(f)$ , измеренной вдоль каналов, увеличивается, а величина сигнала на полке АЧХ в темноте и при малых  $L$  возрастает, что свидетельствует об увеличении проводимости низкоомных областей. В поперечном направлении АЧХ практически не изменяется.

### 3. Обсуждение результатов

Как показывает приведенный выше анализ ВАХ и АЧХ, исследуемые образцы неоднородны по сопротивлению и содержат низкоомные области, разделенные высокоомными прослойками. Поскольку кристаллы в исходном состоянии изотропны и ПК могут быть сформированы в любом направлении, нужно думать, что образец состоит из низкоомных участков, включенных в высокоомный объем. При интенсификации подсветки фотопроводимость высокоомных участков превышает проводимость низкоомных, что приводит к шунтированию последних. Этим объясняется зависимость сигнала на полке АЧХ от  $L$ , характерная для высокоомного фоточувствительного кристалла, а также линейность ВАХ и изотропность образца по сопротивлению при больших  $L$  до формирования ПК.

Наличие остаточной проводимости свидетельствует о том, что низкоомные области по крайней мере в одном из направлений имеют размеры порядка ширины области пространственного заряда [10]

$$d = (\varepsilon\varphi/2\pi e^2 n)^{1/2},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная,  $\varphi$  — высота барьера на границе низкоомной и высокоомной областей, равная разности уровней Ферми  $E_f$  в этих областях,  $n$  — концентрация свободных электронов в низкоомной части.

Тот факт, что равновесная проводимость низкоомных включений в области (300–80) К не зависит от температуры, означает, что в этих включениях  $n \geq 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, так как именно при  $n \approx 10^{16}$  см<sup>-3</sup> практически исчезает температурная зависимость проводимости в этой области температур в кристаллах CdS [11]. Таким образом, в низкоомных областях  $E_f \leq 1$  эВ. Определить точное значение  $n$ , а следовательно, и  $E_f$  в высокоомных областях не представляется возможным, так как неизвестны их точные размеры. Известно, однако, что в высокоомных фоточувствительных кристаллах обычно  $E_f = (0.5 \div 0.6)$  эВ [5]. Используя эти значения, получим  $d \approx 0.3$  мкм. Следовательно, низкоомные области могут представлять собой либо нити, либо участки плоскостей толщиной менее или порядка 0.6 мкм, либо шарики с таким же диаметром. Последнее мало вероятно, поскольку в этом случае средняя толщина высокоомного промежутка при их суммарной толщине ( $10^{-3} \div 10^{-2}$ ) см на 1 см длины образца составила бы всего  $(10 \div 100)$  Å.

Таким образом, исследуемые кристаллы, по-видимому, содержат проводящие нити или участки плоскостей, расположенные в разных направлениях и пересеченные узкими высокоомными промежутками. Приложенное к образцу поле концентрируется на высокоомных промежутках, в результате чего, как показывает эксперимент, в этих промежутках начинает протекать процесс, приводящий к появлению токов

двойной инжекции. Для того чтобы в полупроводнике  $n$ -типа мог протекать ток двойной инжекции, один из электродов (катод) должен быть омическим, способным инжектировать в кристалл электроны, в то время как второй (анод) — запорным, способным инжектировать дырки. Приложенное к образцу поле должно быть при этом достаточно велико, чтобы время пролета дырки между электродами было меньше времени ее жизни в валентной зоне [6]. В нашем случае роль электродов играют низкоомные области, между которыми находится высокоомный промежуток. Омическим электродом может служить низкоомная область, прилегающая к высокоомному промежутку со стороны катода. Что касается запорного контакта, то он может быть сформирован в прианодной области высокоомного промежутка в результате дрейфа подвижных дефектов в электрическом поле, что приводит к образованию в этой области тонкого изолирующего слоя [3,4]. Именно такой механизм формирования контакта, инжектирующего дырки, имеет место в содержащих подвижные доноры кристаллах CdS с омическими электродами [6-8].

О том, что в нашем случае также реализуется этот механизм, свидетельствуют следующие факты.

1. Образование ПК наблюдается только в тех кристаллах, в которых присутствуют подвижные дефекты.

2. Время формирования ПК коррелирует со скоростью диффузии имеющихся в кристалле подвижных дефектов (минуты при 300 К — для кристаллов, содержащих более подвижные доноры Li, и десятки минут — для кристаллов, содержащих менее подвижные доноры Cd; [1]).

3. После отключения напряжения процесс «рассасывания» ПК происходит с той же скоростью, что и релаксация сопротивления приэлектродных областей (изменившегося вследствие дрейфа дефектов в электрическом поле) в кристаллах CdS, содержащих Li; или Cd; соответственно [1].

4. После формирования ПК кристалл обладает высокой проводимостью только при определенной полярности приложенного напряжения. Это объясняется тем, что запорный контакт в этом случае оказывается включенным в пропускном направлении. При изменении полярности приложенного к образцу напряжения вначале токи двойной инжекции протекать не могут, так как контакт, инжектирующий дырки, оказывается включенным в запорном направлении; со временем вследствие дрейфа дефектов начинается рассасывание образованной ранее и формирование новой изолирующей прослойки на противоположной стороне высокоомного промежутка.

5. При интенсивной подсветке, когда фотопроводимость высокоомных промежутков становится сравнимой с проводимостью низкоомных областей или даже превышает ее, вследствие чего напряженность поля в высокоомных промежутках падает, формирование ПК не происходит.

Таким образом, ПК в исследованных кристаллах представляют собой низкоомные области, разделенные изначально высокоомными промежутками, в которых при приложении достаточно высокого напряжения протекают токи двойной инжекции. Как следует из измерений АЧХ, в процессе формирования ПК проводимость низкоомных областей также несколько возрастает. Природа этого эффекта, так же как и природа низкоомных участков, является предметом дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] И.А. Дроздова, Н.Е. Корсунская, И.В. Маркевич. ФТП, 353 (1994).
- [2] Б.В. Марков, А.А. Давыдов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., 7, 575 (1971).
- [3] А.С. Гершун, Л.А. Сысоев, Б.Л. Тиман. ФТТ, 8, 3712 (1966).
- [4] Н.Е. Корсунская, И.В. Маркевич, Т.В. Торчинская, М.К. Шейнкман. ФТП, 13, 435 (1979).
- [5] Р. Бьюб. *Фотопроводимость твердых тел* (М., Иностран. лит., 1962) гл. 5.
- [6] G.A. Marlos, J. Woods. Proc. Phys. Soc., 81, 1013 (1963).
- [7] С.Н. Ненгу, К. Nassau, J.W. Shiever. Phys. Rev. B, 4, 2453 (1971).
- [8] Н.Е. Корсунская, И.В. Маркевич, М.К. Шейнкман. ФТТ, 10, 522 (1968).
- [9] В.Е. Лашкарев, А.В. Любченко, М.К. Шейнкман. *Неравновесные процессы в фотопроводниках* (Киев, Наук. думка, 1981).
- [10] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, 10, 209 (1976).
- [11] *Физика и химия соединений  $A^2B^6$* , под ред. А.В.Медведева (М., 1970).

Редактор Т.А. Полянская

### **A mechanism of formation of conducting channels in CdS crystals under the action of the electric field**

*I.A.Drozдова, B.Embergenov, N.E.Korsunskaya, I.V.Markevich, A.F.Singaevesky*

Semiconductor Institute, Ukrainian Academy of Sciences, 252650 Kiev, the Ukraine

---