

УДК 621.383

## Отрицательная инфракрасная фотопроводимость в пленках $CdS_{1-x}Se_x$

А. Ш. Абдинов, М. А. Джафаров, Г. М. Мамедов, Э. Ф. Насиров  
Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан

*Впервые в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$  обнаружена отрицательная инфракрасная фотопроводимость (ОФП) в области длины волны 0,700—1,23 мкм при значениях интенсивности возбуждающего света  $\Phi = 100—400$  лк, электрического поля  $E = 0,5—130$  В/см и температуры  $T = 265—310$  К. Установлено, что основные закономерности ОФП объясняются на основе двухбарьерной модели. Показано, что в рассмотренных условиях носители заряда преодолевают барьер туннелированием. Пленки  $CdS_{1-x}Se_x$  могут быть использованы в ИК-технике и негатронике.*

В последние годы был достигнут значительный прогресс в изготовлении фотоприемников с большой чувствительностью для применения в приборах ночного видения, анализа загрязнений окружающей среды и во многих областях твердотельной электроники. Однако такие широко распространенные области техники не могут успешно развиваться без применения фотоприемников ИК-излучения.

В настоящее время хорошо известно, что полупроводники типа соединений  $A^2B^6$ , полученные простым и дешевым методом — химическим осаждением, обладают различными фотоэлектрическими свойствами [1, 2]. Изменяя состав и скорость вращения реакционной смеси, длительность процесса осаждения, угол наклона подложки при нахождении в растворе и управляя режимом термической обработки (ТО), можно изготовить высокофоточувствительные фотоприемники с отрицательной фотопроводимостью.

### Эксперимент

Пленки  $CdS_{1-x}Se_x$  ( $0 \leq x \leq 0,4$ ) толщиной 7—12 мкм получены на ситалловых подложках химическим методом ( $CdSO_4 + (NH_2)_2CS + (NH_2)_2CSe + NH_4OH + H_2O$ ) при температуре 80—90 °С в течение 20—30 мин. В зависимости от состава пленок темновая проводимость составляла  $\sim 10^{-5}—10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Пленки имели концентрацию носителей  $4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> для  $x = 0—0,2$  и  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> для  $x = 0,4$ .

При освещении проводимость пленок  $CdS_{1-x}Se_x$  сначала незначительно увеличивается, а потом резко уменьшается относительно темнового тока, и наблюдается отрицательная фотопроводимость.

С ростом интенсивности света зависимость имеет характер насыщения. При оптимальных условиях кратность ОФП составляла  $\alpha = I_T/I_F \geq 10^3$  ( $I_T$  — значение темнового, а  $I_F$  — светового тока).

Рис. 1 иллюстрирует спектр отрицательной фотопроводимости при различных значениях

интенсивности света. При относительно малых интенсивностях света изучаемые пленки имеют спектральную характеристику ОФП с широким максимумом в области длины волны 0,70—1,23 мкм. При малых интенсивностях возбуждающего света время нарастания и спада фототока мало отличается друг от друга. Но при увеличении интенсивности света время спада уменьшается и не превышает нескольких секунд, а время нарастания увеличивается и при максимальной интенсивности света достигает нескольких часов.

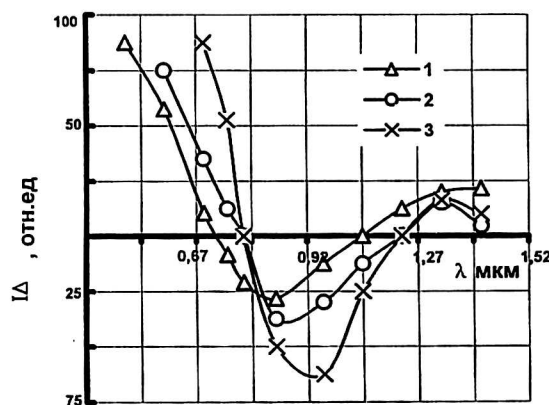


Рис. 1. Спектральное распределение отрицательной фотопроводимости пленок  $CdS_{0,6}Se_{0,4}$  при различных интенсивностях света ( $\Phi$ , лк):  
1 — 350; 2 — 200; 3 — 100

Установлено, что отрицательная фотопроводимость проявляется лишь в некоторых интервалах значений интенсивности падающего на образец светового потока (рис. 2), приложенного напряжения и температуры.

На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) пленок  $CdS_{0,6}Se_{0,4}$ , не подвергнутых термической обработке.

Кривая 2 (см. рис. 3) иллюстрирует зависимость темнового тока от приложенного напряжения. При малых напряжениях (0—6 В) на ВАХ

наблюдается линейный участок. С увеличением напряжения от 6 до 20 В линейный участок ВАХ переходит в суперлинейный участок, а при более высоких напряжениях зависимость имеет вид  $I \sim U^\beta$ , где  $\beta > 2$ . При уменьшении приложенного напряжения на ВАХ наблюдается гистерезис. С увеличением интенсивности падающего на образец света пленки  $CdS_{1-x}Se_x$  показывают остаточную проводимость (см. рис. 3, кривая 3), и при более высоких значениях интенсивности света характеристика почти спрямляется в широкой области напряженности электрического поля (см. рис. 3, кривая 1) (0,5–130 В/см).

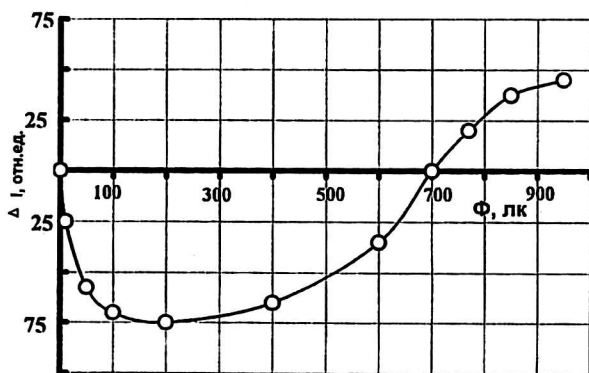


Рис. 2. Зависимость фототока в пленках  $CdS_{0,6}Se_{0,4}$  от интенсивности света в области отрицательной фотопроводимости при  $T = 300 K$

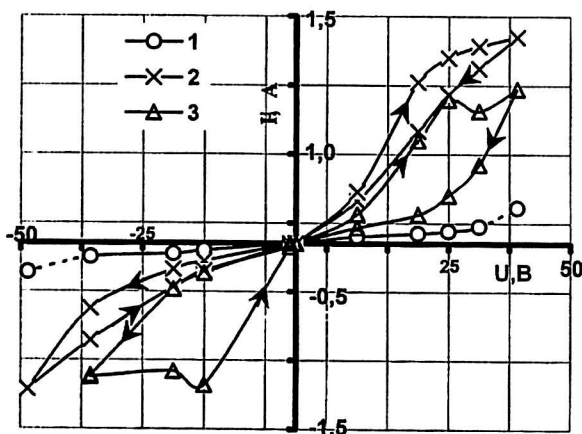


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика пленок  $CdS_{0,6}Se_{0,4}$  при различных условиях,  $T = 300 K$ :  
1 — световой; 2 — темновой; 3 — в состоянии ОП

Следует отметить, что фотоэлектрические свойства пленок не зависят от материала токовых контактов и их освещенности.

### Обсуждение результатов

Существуют различные модели, объясняющие природу механизмов, обуславливающих формирование восходящей ветви ВАХ полупроводниковых материалов [3, 4]. По-видимому, вид этой ветви ВАХ в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$  определяется в

основном явлением инжекции носителей при наличии захвата их на ловушках. Экспериментальная величина тока в образцах существенно меньше теоретического значения, полученного для идеального полупроводника. При малых значениях электрического поля инжектированные электроны локализируются на ловушках, и это приводит к уменьшению тока. Резкое возрастание тока при больших значениях электрического поля связано с освобождением мелких ловушек полем или ударной ионизацией быстро движущихся электронов. Захват инжектированных носителей заряда на ловушках приводит к медленному падению тока через образец при фиксированном напряжении и к появлению гистерезиса на ВАХ при вводе-выводе электрического тока.

При освещении происходит заполнение ловушек фотоэлектронами или переход электронов непосредственно из валентной зоны на уровни дефектов, связанных, по нашему мнению, адсорбированными атомами кислорода. При сравнении кривых темнового и светового тока видно, что существует область напряжений, где фототок имеет меньшую величину, чем темновой, при тех же значениях приложенного напряжения, и в этой же области возникает отрицательная фотопроводимость.

Известно, что ОФП наблюдается в полупроводниках с долговременными релаксациями проводимости. В последнее время сложилось мнение, что это явление в большинстве случаев связано с наличием в объектах исследований макроскопических потенциальных барьеров. В общем случае эти барьеры связываются с неоднородностями различного происхождения, к списку которых можно отнести монокристаллические границы, дислокации, кластеры и др. Наличие таких неоднородностей приводит к перестройке всей физической картины фотоэлектрических явлений. Имеющийся обширный экспериментальный материал позволяет сформулировать некоторые основные закономерности ОФП:

ОФП может возбуждаться как собственным, так и примесным светом, причем картина физического явления при этом меняется;

кратность ОФП (отношение фотопроводимости к темновой проводимости) изменяется в широких пределах и в отдельных случаях достигает до значений порядка  $\sim 10^3$ ;

ОФП наблюдается при некоторых значениях электрического поля, интенсивности светового потока и температуры.

Указанные выше особенности являются более общими и обнаруживаются почти во всех неоднородных системах, обладающих свойствами ОФП. В отдельных конкретных случаях могут наблюдаться также другие специфические особенности. Следует отметить, что, несмотря на вышеуказанные обобщенные особенности, для

ОФП не существует единой физической модели, так как ОФП в различных случаях имеет различную природу.

Во многих работах процессы ОФП объясняются на основе неоднородной барьерной модели [5]. Суть этого механизма заключается в том, что в образце имеются включения, содержащие глубокие донорные центры. Генерированные дырки при освещении из области примесного поглощения уходят за пределы включений и рекомбинируются с находящимися там электронами, и это приводит к возникновению ОФП. Тепловой переброс электронов через потенциальный барьер, связанный с неоднородностями образца, приводит к долговременной кинетике ОФП.

Однако ОФП, наблюдаемая в наших пленках  $CdS_{1-x}Se_x$ , плохо укладывается в рамки упомянутой модели.

Во-первых, кратность ОФП для пленок  $CdS_{1-x}Se_x$ , определенная теоретически, согласно формуле [5]

$$\Delta\sigma = -e\mu_n \left[ N_i R^2 \frac{T}{e} \sqrt{\frac{2\pi\chi}{n^* U_0}} \ln \left( 1 + \frac{\vartheta_p}{\vartheta_n} \frac{\Delta p}{n} \right) \right],$$

где  $N_i$  — концентрация включений;  
 $\mu_n$  — подвижность электронов;  
 $\chi$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  
 $\vartheta = D/L$ ;

$D$  и  $L$  — коэффициент и длина диффузии, составляет 100—200. Но кратность ОФП, определенная экспериментально для пленок  $CdS_{1-x}Se_x$ , составляет  $\sim 5 \cdot 10^2 - 10^3$ .

Во-вторых, с увеличением электрического поля ОФП в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$  наблюдается лишь в некоторых интервалах электрического поля.

В-третьих, при температурном интервале 210—310 К вероятность туннелирования электронов через трапецидальный барьер (для обобщения результатов мы считали форму барьера трапецидальной, связанной с неоднородностями) больше вероятности теплового переброса

$$P = \exp \left\{ - \left[ \sqrt{\frac{2m}{\hbar}} \left[ 2a\sqrt{U-E} + \frac{4}{3}(b-a) \frac{(U-E)^{3/2}}{U} \right] + \frac{E-U_0}{kT} \right] \right\}$$

где  $a$  и  $b$  — основания трапецидального барьера.

В-четвертых, согласно неоднородным барьерным моделям, ОФП наблюдается в некотором интервале длины волны. Верхняя граница этого интервала соответствует энергии фотоионизации дырок, а нижняя — соответствует ширине запрещенной зоны полупроводника. Но коротковолновая граница ОФП в наших случаях не соответствует ширине запрещенной зоны пленок  $CdS_{1-x}Se_x$ .

Для решения этих противоречий в настоящей статье предложена модель, позволяющая объяснить вышеуказанные закономерности ОФП.

При теоретическом анализе фотоэлектрических явлений различные виды неоднородностей полупроводников обычно разделяются на три более общие группы:

1. Высокоомные включения в низкоомной матрице [6]. Эта модель хорошо описывает полупроводники с неоднородно распределенными глубокими примесями, кластерами дефектов, включениями инородной фазы.

2. Случайный потенциальный рельеф. Эта модель описывает сильнолегированные компенсированные, аморфные и стеклообразные полупроводники [7].

3. Межкристаллитные (МК) барьеры, которые существуют и в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$ . При этом высоты барьеров, перпендикулярных к направлению тока, являются переменными, и они образуются вследствие флуктуации плотности и спектра поверхностных состояний на границах разупорядоченных областей. В случае однородных барьеров, когда их высота постоянна по всему объему образца, движение и рекомбинация носителей тока определяются одинаковыми барьерами, при этом наблюдается обычная положительная фотопроводимость.

Как показывает анализ результатов исследований, при извлечении полупроводников из технологического объема в атмосферу хемосорбция атомов кислорода на поверхности создает глубокие акцепторные состояния [8]. Захват ими свободных электронов образца приводит к образованию слоя истощения и вследствие этого к уменьшению фотопроводимости. При этом на поверхности полупроводника образуется потенциальный барьер, связанный с адсорбированным кислородом (АК) [9]. Поэтому механизм образования ОФП нельзя объяснять только наличием потенциальных барьеров на МК. По нашему мнению, ОФП в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$  связана с наличием двух этих барьеров. Туннельный переход электронов с барьера на МК в барьер на АК приводит к уменьшению кратности ОФП. Последующий переход электронов с потенциального барьера на АК в зону проводимости приводит к исчезновению ОФП и установлению обычной положительной фотопроводимости.

Таким образом, можно сказать, что ОФП в пленках  $CdS_{1-x}Se_x$  возникает в таком интервале температуры, интенсивности света и напряжения, в котором вероятность теплового перехода электронов должна быть меньше, чем вероятность туннельного перехода.

## Литература

1. Джафаров М. А. Фотоэлектрические свойства пленок  $Cd_{1-x}Zn_xS$ , осажденных из водного раствора // Неорг. матер., 1999. Т. 35. Вып. 11. С. 1307—1312.

2. Абдинов А. Ш., Джафаров М. А., Мехтиева Н. М., Мамедов Г. М., Насиров Э. Ф. Фотоприемники ИК-излучения на основе пленок  $CdS_{1-x}Se_x$ , осажденных из раствора// Прикладная физика. 2000. № 6. С. 63—68.

3. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Отрицательная остаточная фотопроводимость в монокристаллах селенида индия// ФТП. 1975. Т. 9. № 12. С. 2382—2385.

4. Zeenath N. A., Varkey K. P., Vijayakumar K. P. Electrical studies on trap levels present in *n*- and *p*-type spray pyrolysed CdS thin films// J. Phys.: Condens. Matter. 1998. V. 10. № 9. P. 2053—2063.

5. Шик А. Я. Отрицательная фотопроводимость и инфракрасное гашение остаточной проводимости в неоднородных полупроводниках// ФТП, 1976. Т. 10. Вып. 7. С. 1355—1360.

6. Шейнкман М. К., Маркевич И. В., Хвостов В. А. Модель остаточной проводимости в полупроводниках и ее параметры в  $CdS:Ag:Cl$ // ФТП, 1971. Т. 5. Вып. 10. С. 1904—1911.

7. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в модели искривленных зон// В. сб.: Материалы X зимней школы по физике полупроводников. — Л., 1982. С. 3032.

8. Weber E. H. Surface photoconductivity of CdS influenced by chemisorption and desorption of oxygen// Phys. Status Solidi. 1968. V. 28. № 2. P. 649—661.

9. Ризаханов М. А., Магомедов М. А., Магомедов Х. А. Энергии активации чисто термической и фотостимулированной десорбции кислорода с поверхности CdSe// Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 32. Вып. 6. С. 416—419.

## Negative infrared photoconductivity in $CdS_{1-x}Se_x$ films

A. Sh. Abdinov, M. A. Jafarov, G. M. Mamedov, E. F. Nasirov  
Baku state university, Baku, Republic of Azerbaijan

*The negative infrared photoconductivity (NPH) has been observed for the first time in  $CdS_{1-x}Se_x$  films, in the wavelength region of 0.700—1.23  $\mu m$ , at values of stimulating light intensity  $\Phi = 100—400$  Lk, electrical field  $E = 0.5—130$  V/cm and temperature  $T = 265—310$  K. It is established, that basic laws of NPH explains on the basis of two-barrier model and in the considered conditions a charge carriers, overcome a barrier by tunneling. A films of  $CdS_{1-x}Se_x$  can be used in IR engineering and negatronics.*

\* \* \*