

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ  $\text{cAs}$ ,  
ЛЕГИРОВАННОГО ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ИОНОВ ФОСФОРА**

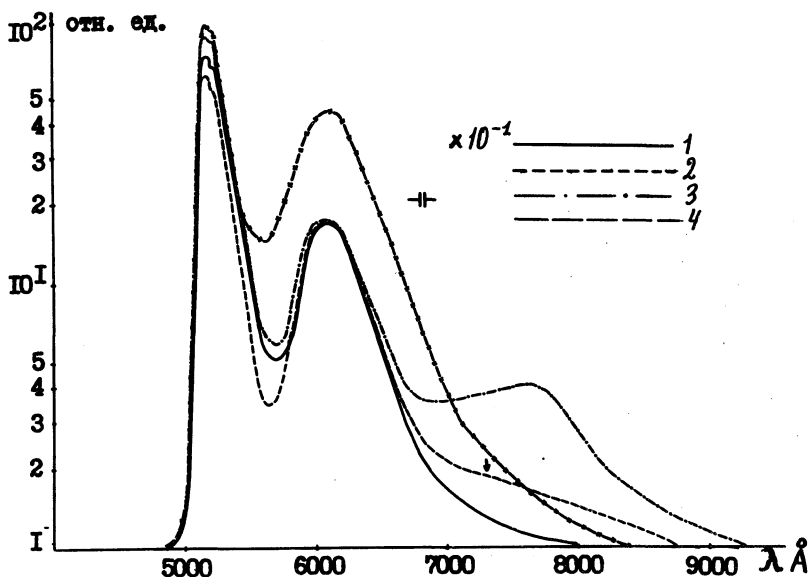
**В. В. Краснопеццев, Чан Ким Лой, П. В. Шапкин**

В связи с успешным использованием ионного внедрения для легирования алмаза, кремния и других полупроводников естественно было ожидать, что этот метод окажется достаточно перспективным и для соединений типа  $\text{cAs}$ . Однако несмотря на усилия, затраченные в последние годы рядом исследователей при получении дирично-го сульфида кадмия путем внедрения ионов акцепторных примесей /1-5/, решение проблемы управляемого легирования этого интересно-го и важного с практической точки зрения материала далеко от завершения. Вместе с тем до сих пор остаются неясными и механизм образования многих собственных дефектов  $\text{cAs}$  и примесных центров, включая центры, обуславливающие зеленое краевое излучение /6/. В настоящем сообщении представлены некоторые результаты эксперимен-тального исследования фотолюминесценции и фотопроводимости  $\text{cAs}$ , легированного путем внедрения ионов фосфора.

Исходные монокристаллы  $\text{cAs}$  были выращены из газовой фазы методом пересублимации порошка  $\text{cAs}$  в потоке аргона и обладали удельным сопротивлением  $10^9-10^{12}$  ом.см. Для ионного легирования использовались кристаллы, которые проявляли интенсивную зеленую (максимум около  $5165 \text{ \AA}$ ) и желтую (максимум при  $6090 \text{ \AA}$ ) люминес-ценцию при температуре жидкого азота. Бомбардировка образцов ио-нами  $^{31}\text{P}$  с энергией до 80 кэВ производилась при комнатной темпе-ратуре и дозах от  $10^{13}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Точная ориентация кристалла относительно направления ионного пучка не предусматривалась. По-следующий отжиг легированных образцов проводился в насыщенных па-рах  $\text{cAs}$  и серы, а также в аргоне при температурах до  $400^\circ\text{C}$  в те-чение 15-30 мин.

Для возбуждения люминесценции использовался свет отдельной линии (длина волны  $3650 \text{ \AA}$ ), выделенной из спектра ртутной лам-

ны. Фотопроводимость наблюдалась на переменном напряжении частоты 420 гц при возбуждении светом мощной ленточной лампы накаливания. Запись спектров фотолуминесценции и фотопроводимости осуществ-



Р и с. 1. Спектры фотолуминесценции  $\text{CdS}$ : 1 - для исходного кристалла; 2 - после внедрения ионов  $\text{P}$  с энергией 80 кэв при дозе  $0,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; 3 - для необлученного кристалла, подвергнутого термообработке в парах  $\text{CdS}$  при  $400^\circ\text{C}$ ; 4 - после отжига облученного кристалла в парах  $\text{CdS}$  при  $400^\circ\text{C}$ .

влялась при температуре жидкого азота и комнатной температуре в диапазоне длин волн от 4000 до 11000 Å (3,10-1,13 эв). Спектральная ширина щели не превышала 30 Å. Чувствительность записывающей системы составляла 25 вт/в.

На рис. 1 представлены спектральные кривые луминесценции кристалла  $\text{CdS}$  до (кривая 1) и после внедрения в него ионов  $\text{P}$  с энергией 80 кэв при дозе  $0,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (кривая 2). (Масштаб для кривой 1 уменьшен в 10 раз). Сразу после внедрения ионов интенсивность зеленого и желтого излучений падает по сравнению с

люминесценцией исходного кристалла примерно на порядок, а в длинноволновой области спектра появляется слабая полоса излучения с максимумом около  $7200 \text{ \AA}$ . Столь сильное уменьшение излучения в результате ионной бомбардировки кристалла объясняется, по-видимому, возникновением в  $\text{cдs}$  глубоких ловушек носителей заряда, связанных с радиационными нарушениями кристаллической решетки. В процессе последующей термообработки облученного образца в парах  $\text{cдs}$  при  $400^\circ\text{C}$  слабая полоса излучения с максимумом при  $7200 \text{ \AA}$  исчезает, а вместо нее появляется новая, гораздо более интенсивная полоса люминесценции с максимумом около  $7650 \text{ \AA}$  (кривая 4, рис. 1). Если отжиг легированного кристалла проводится в парах серы, то интенсивность новой полосы излучения оказывается существенно ниже, чем в первом случае. Одновременно с возникновением полосы при  $7650 \text{ \AA}$  зеленая и желтая люминесценции несколько восстанавливается, а удельное сопротивление легированного слоя  $\text{cдs}$  возрастает на два-три порядка.

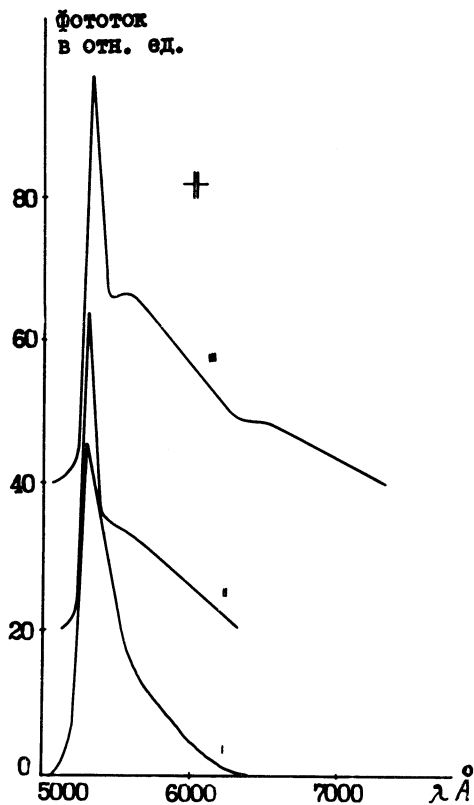
Все эти факты указывают на то, что внедрение ионов фосфора в сульфид кадмия сопровождается образованием большого количества радиационных нарушений, которые обуславливают появление красной люминесценции с максимумом при  $7200 \text{ \AA}$ . Высокотемпературный отжиг облученных образцов приводит, очевидно, к существенному восстановлению кристаллической решетки  $\text{cдs}$  и, в частности, к замещению части томов серы в узлах внедренными ионами фосфора и к компенсации донорных центров, присутствующих в исходных кристаллах. Новая полоса люминесценции с максимумом при  $7650 \text{ \AA}$  связана, по-видимому, с рекомбинацией электрона и дырки с участием центра, включающего в себя примесный атом фосфора. Следует подчеркнуть, что отжиг необлученного кристалла в аналогичных условиях вызывает лишь уменьшение интенсивности зеленого и желтого излучений, характерных для исходного  $\text{cдs}$ , и не приводит к образованию новых центров люминесценции в исследуемой области спектра (см. рис. 1, кривая 3).

Убедительным подтверждением предполагаемой природы полос излучения с максимумами при  $7200$  и  $7650 \text{ \AA}$  являются данные о фотолюминесценции в  $\text{cдs}$ , подвергнутом бомбардировке ионами  $^{40}\text{Ar}$  и последующей термообработке в условиях, аналогичных условиям в случае внедрения ионов P (энергия и доза ионов, тем-

пература, атмосфера и продолжительность отжига). Поскольку благородные газы являются электрически (оптически) неактивными примесями в полупроводниках, основной результат внедрения ионов  $\text{Ag}$  в  $\text{CdS}$  сводится, как и при бомбардировке ионами  $\text{P}$ , к разупорядочению кристаллической решетки. Действительно, сразу после внедрения ионов  $\text{Ag}$  в спектре фотолюминесценции  $\text{CdS}$  появляется полоса излучения с максимумом при  $7200 \text{ \AA}$ , которая полностью исчезает при последующей термообработке облученного кристалла. Никакой новой полосы в длинноволновой части спектра при этом не возникает. Последнее обстоятельство говорит о том, что полоса излучения при  $7200 \text{ \AA}$  обусловлена образованием при ионном внедрении радиационных нарушений решетки, а новый максимум при  $7650 \text{ \AA}$  связан с присутствием в  $\text{CdS}$  внедренных атомов фосфора.

На рис. 2 показаны спектры фотопроводимости исходного кристалла  $\text{CdS}$  (I), кристалла, отожженного в парах сульфида кадмия при  $400^\circ\text{C}$  (II), и кристалла  $\text{CdS}$ , легированного ионами  $\text{P}$  с энергией  $80 \text{ кэВ}$  при дозе  $0,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и подвергнутого последующей термообработке при тех же условиях (III). (Для удобства спектральные кривые II и III сдвинуты относительно кривой I по ординате вверх соответственно на 20 и 40 отн. ед.) Из приведенной картины следует, что кроме основного интенсивного пика фотопроводимости и фотопроводимости в примесной области спектра, возникающей вследствие термообработки кристалла (см. кривые I и II), в длинноволновой части видимого спектра после внедрения в  $\text{CdS}$  ионов  $\text{P}$  и отжига облученного кристалла появляется третий широкий пик фотопроводимости (кривая III). Длина волны, соответствующая значению фотопроводимости, равному 0,1 от величины проводимости в области ее относительно плавного изменения (с длинноволновой стороны спектра)  $/7/$ , составляет в последнем случае около  $7320 \text{ \AA}$  (1,69 эв). Положение этой спектральной области практически совпадает с новым максимумом красной люминесценции, расположенным при  $7650 \text{ \AA}$  (1,62 эв, полуширина 0,26 эв, см. рис. 1), что свидетельствует, очевидно, о присутствии в решетке одного и того же центра, связанного с внедренными атомами  $\text{P}$ .

Таким образом, внедрение ионов фосфора в  $\text{CdS}$  вместе с последующим отжигом облученного кристалла приводит к образованию в решетке сульфида кадмия примесного центра, обуславливающего



Р и с. 2. Спектры фотопроводимости  $CdS$ : I - для исходного кристалла; II - для необлученного кристалла, подвергнутого термообработке в парах  $CdS$  при  $400^{\circ}C$ ; III - после внедрения ионов  $P$  с энергией  $80$  кэВ при дозе  $0,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и отжига в парах  $CdS$  при  $400^{\circ}C$ .

появление полос люминесценции и фотопроводимости в длинноволновой области спектра. Новый примесный центр скорее всего является акцептором и представляет собой атом фосфора, расположенный в узле решетки, принадлежащем атому серы. Энергетический уровень, отвечающий этому центру, отстоит от валентной зоны примерно на  $0,72$  эв.

Авторы признательны И. П. Акимченко за плодотворное обсуждение экспериментальных результатов, В. С. Вавилову за постоянное внимание к работе, А. А. Громадину за активное участие в монтаже экспериментальной установки, В. М. Коннову за помощь в ряде экспериментов, Ю. В. Милютину за проведение опытов по ионному внедрению.

Поступила в редакцию  
14 августа 1972 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. W. W. Anderson, I. T. Mitchell. Appl. Phys. Letts, 12, 334 (1968).
2. F. Chernow, G. Eldridge, G. Ruse, L. Wählin. Appl. Phys. Letts., 12, 339 (1968).
3. B. Tell, W. M. Gibson. J. Appl. Phys., 40, 5320 (1969).
4. M. Oshima, R. Takahashi. J. Electrochem. Soc., 118, 489 (1971).
5. W. W. Anderson, R. M. Swanson. J. Appl. Phys., 42, 5125 (1971).
6. Физика и химия соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Изд-во "Мир", М., 1970 г.
7. Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел. ИИИ, М., 1962 г.