

УДК 621.383.4

## О возможности плазменного резонанса в пленках CdS-PbS в средней инфракрасной области спектра

А. Г. Роках, М. И. Шишкин, А. А. Скапцов, В. А. Пузыня

*Выполнено моделирование плазменного резонанса в пленках CdS-PbS на гладком стекле по методикам Кухарского-Субашиева и Д. И. Биленко. На матированном стекле обнаружен тот же минимум в спектре оптического отражения при 6 мкм, что и на гладком стекле. Природа оптического резонанса, как и в «чистом» сульфиде кадмия, связывается с избыточным кадмием, образующим донорную примесь, хотя для ее выяснения требуются дополнительные исследования.*

PACS: 78.66.Hf, 78.30.Fs

**Ключевые слова:** ограниченные твердые растворы, CdS-PbS, моделирование, плазменный резонанс, спектр, оптическое отражение, средняя инфракрасная область спектра.

### Введение

Как известно из предыдущих исследований, CdS-PbS-пленки являются существенно неоднородными, т. е. представляют собой ограниченные твердые растворы CdS в PbS и PbS в CdS в разных соотношениях, а также преципитаты солей легирующих примесей и окислов основных компонент — свинца и кадмия [1]. Ранее основные исследования были выполнены на сублимированных пленках сульфида кадмия-свинца, нанесенных на матированную слюдяную подложку.

Целью данной статьи является исследование оптического отражения и моделировании плазменного резонанса на подобных пленках, нанесенных, главным образом, на гладкую стеклянную подложку, в средней инфракрасной (ИК) области спектра.

### Исследуемые образцы и измерительная аппаратура

Исследуемые образцы представляли собой нанесенные испарением в вакууме на стеклянную подложку пленки сульфида кадмия-свинца толщиной порядка микрона. Пленки проходили отжиг на воздухе при температуре 300 °С для придания фотопроводящих свойств в видимом диапазоне и

стойкости к деградации. Оптические спектры в средней ИК-области снимались на спектрометре Nicolet 6700, а также с использованием спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-41.

### Экспериментальные результаты

На рис. 1 приводится спектр отражения пленки CdS(0,9)-PbS(0,1), обнаруживающий минимум при длине волны около 6 мкм.

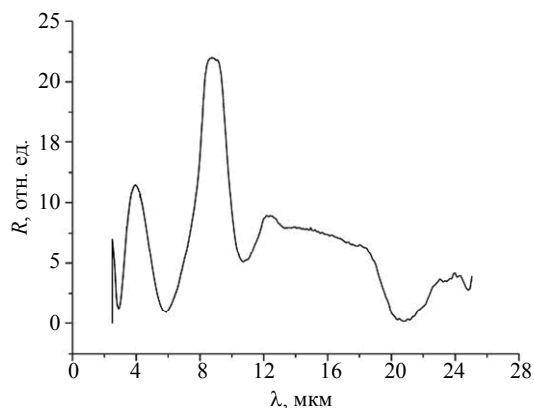


Рис. 1. Спектр отражения пленки CdS-PbS на стеклянной подложке, снятый в среднем ИК диапазоне

Следует отметить, что минимум отражения в той же спектральной области наблюдался на аналогично приготовленных пленках халькогенидов кадмия и связывался с плазменным резонансом носителей заряда [2]. Связь круговой частоты  $\omega$  плазменного резонанса с концентрацией свободных носителей заряда  $N$  дается в виде [3, 4]:

$$\omega^2 = \frac{Nq^2}{m^* \epsilon_0 \epsilon} \quad (1)$$

Здесь  $m^*$  — эффективная масса электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупровод-

Роках Александр Григорьевич, профессор.  
Шишкин Михаил Игоревич, аспирант, инженер.  
Скапцов Александр Александрович, зав. лабораторией.  
Пузыня Виталий Александрович, студент.  
Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского.  
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская 83.  
E-mail: rokakhag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2014 г.

© Роках А. Г., Шишкин М. И., Скапцов А. А., Пузыня В. А., 2014

ника (будем полагать, что это «чистый» CdS),  $q$  — заряд электрона,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная (в системе СИ). Оценка концентрации свободных носителей для длины волны плазменного резонанса  $\lambda = 6$  мкм (рис. 1) дает величину  $N$  порядка  $10^{19}$  см $^{-3}$ .

Отражение пленки имеет локальный минимум около 6 мкм, связанный, предположительно, с плазменным резонансом свободных носителей заряда. Для этого минимума проведено моделирование теоретического спектра отражения, а также расчет некоторых параметров полупроводниковой пленки, например, таких как концентрация свободных носителей  $N$  и подвижность электронов  $\mu$ .

По методике Кухарского-Субашиева [3], а также с использованием материалов работы [4], был рассчитан теоретический вид спектра отражения пленки CdS-PbS в области предполагаемого плазменного резонанса (см. рис. 2).

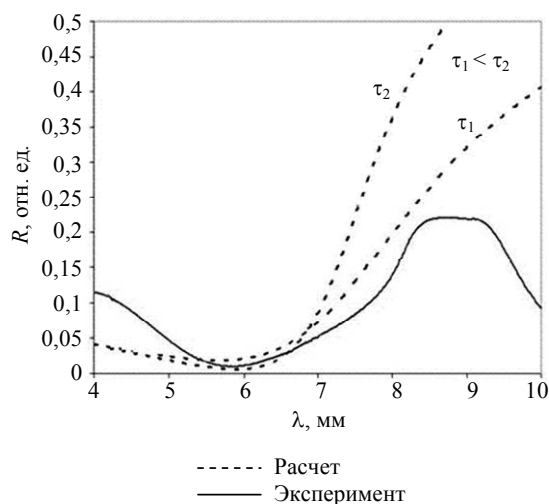


Рис. 2. Спектр отражения пленки CdS-PbS в области плазменного резонанса, рассчитанный по методике Кухарского-Субашиева

Соответствующие расчетные данные параметров пленки занесены в таблицу.

Таблица

Расчетные величины концентрации и подвижности в пленке CdS-PbS

$\lambda_{\text{min}}$ , мкм	$\tau$ , с	$N$ , см $^{-3}$	$\mu$ , см $^2$ /В*с
5,9	$1 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{19}$	6,6·10
	$2 \cdot 10^{-14}$		$1,3 \cdot 10^2$

Расчет проводился при двух значениях времени релаксации  $\tau$ . Он дает разумные значения подвижности основных носителей заряда (электронов). Следует подчеркнуть, что эти значения подвижности получены на оптической частоте, а на постоянном токе или на звуковой частоте они могут быть значительно ниже.

Рассчитанная величина концентрации свободных носителей заряда, которую традиционно

связывают с концентрацией мелких доноров, представляется достаточно высокой, поскольку концентрация центров с глубокими уровнями в этих пленках, измеренная различными методами, обычно не превышает величины  $10^{16}$ — $10^{17}$  см $^{-3}$ . Что касается вопроса о происхождении наблюдаемой высокой концентрации, который может послужить темой отдельного исследования, то отметим, вслед за статьей [2], что места локализации высокой концентрации могут быть разделены высокими потенциальными барьерами. Сама же высокая концентрация обусловлена избыточным кадмием, появляющемся при испарении сульфида кадмия в вакууме.

На рис. 3 представлены спектры отражения аналогичной неотожженной пленки. Мы видим минимум отражения при той же длине волны, только меньшей глубины. Для сравнения там же показан спектр отражения стеклянной подложки. Как видно из рисунка, подложка не оказывает существенного влияния на селективность спектра зеркального отражения пленки в области 6 мкм.

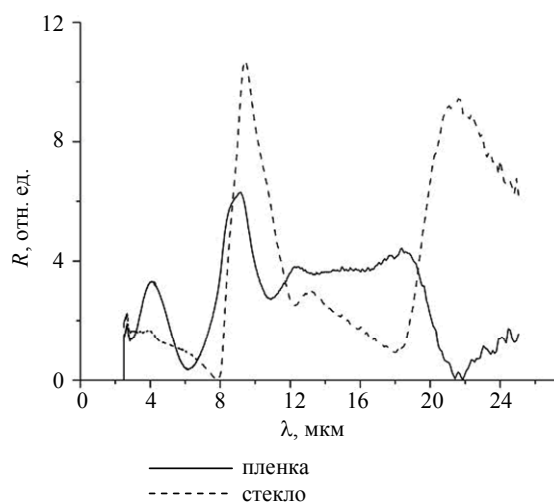


Рис. 3. Спектр отражения от пленки CdS-PbS на матированном стекле (1) и стекла (2)

### Обсуждение результатов

Хотя исследуемые пленки были легированы никелем для уменьшения удельного сопротивления, последнее оставалось для отожженных пленок довольно высоким и в темноте было порядка  $10^6$ - $10^7$  Ом·см. При освещении видимым светом сопротивление снижалось на несколько порядков величины, но в инфракрасном диапазоне оставалось на уровне темного при проведении измерений на постоянном токе или низкой частоте. Понижение сопротивления на оптической частоте, как было показано ранее [2], связано с преодолением потенциальных барьеров за счет токов смещения.

Причины появления плазменного резонанса в широкозонном полупроводнике типа CdS, как

уже говорилось, могут быть связаны с нестехиометрическим избытком кадмия, который обычно ответственен за увеличение проводимости в этом полупроводниковом соединении. Роль добавки узкозонного полупроводника PbS ещё предстоит оценить. Заметим попутно, что эта добавка приводит к увеличению радиационной стойкости полупроводника [5].

### Заключение

Как сообщалось в [6], наличие области плазменного резонанса в оптическом спектре отражения может быть перспективно для превращения чисто оптического явления в фотоэлектрическое. Такое заключение, сделанное по аналогии, уже находит свое подтверждение для поверхностного резонанса и заслуживает более внимательного изучения.

Пленки сульфида кадмия-свинца, возможно, не являются лучшим объектом для изучения про-

явлений плазменного резонанса вследствие низкой добротности этих полупроводников. В соединениях  $A^3B^5$ , например, в арсениде галлия, добротность значительно выше вследствие более высокой подвижности. Однако использование полупроводниковой мишени в качестве фотокатода требует наличия высокой стойкости к деградации, которой обладают пленки указанных сульфидов.

### Литература

1. Роках А. Г., Кумаков А. В., Елагина Н. В. // ФТП. 1979. Т. 13. № 4. С. 787.
2. Роках А. Г., Кац Н. Б. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 1. С. 6.
3. Кухарский А. А., Субашиев В. К. // ФТП. 1970. Т. 4. № 2. С. 287.
4. Биленко Д. И. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Плазменный резонанс свободных носителей заряда в полупроводниках. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999.
5. Роках А. Г. // Письма в ЖТФ, 1984. Т. 10. № 13. С. 820.
6. Роках А. Г., Шишкин М. И., Вениг С. Б. и др. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 11—14.

## On the possibility of the plasma resonance in CdS-PbS films in the middle infrared region

A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, A. A. Skaptsov, and V. A. Puzynya

Saratov State University  
83 Astrahanskaya str, Saratov, 410012, Russia  
E-mail: rokakhag@mail.ru

Received August 10, 2014

*Modeling of the plasma resonance in CdS-PbS films on a smooth glass on Kuharskii-Subashiev and also D. I. Bilenko methods was fulfilled. It was discovered on a matted glass the same minimum in the spectrum of optical reflection at  $6 \mu\text{m}$  as on the smooth one. The nature of the plasma resonance, as in pure cadmium sulfide, is associated with excessive cadmium, forming a donor impurity, although more research is needed for the final conclusion.*

PACS: 78.66.Hf, 78.30.Fs

*Keywords:* limited solid solutions, CdS-PbS; simulation, plasma resonance, spectrum, optical reflection, middle infrared region.

### References

1. A. G. Rokakh and N. V. Elagina, Semiconductors **13**, (1979).
2. A. G. Rokakh and N. B. Kats, Tech. Phys. Lett. **5**, 6 (1979).
3. A. A. Kukhaeskij and V. K. Subashev, Semiconductors **4**, 287 (1970).
4. D. I. Bilenko, *Complex Permeability. Plasma Resonance in Semiconductors* (Saratov State University, Saratov, 1999) [in Russian].
5. A. G. Rokakh, Tech. Phys. Lett. **10**, 820 (1984).
6. A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, S. B. Venig, et al., Prikladnaya Fizika, No. 5, (2014).