

УДК 621.383.4

## Аналогии между экзоэлектронной фотоэмиссией и вторично-ионным фотоэффектом в полупроводниках

А. Г. Роках, М. И. Шишкин, С. Б. Вениг, М. Д. Матасов, В. С. Аткин

*Ранее нами было показано, что увеличение выхода вторичных ионов из полупроводника при подсветке связано с раскачкой кристаллической решетки за счет энергии рекомбинирующих электронно-дырочных пар в узкозонной фазе. Применение подобных рассуждений к электронному газу в полупроводниках наводит на мысль о возможности туннельной фотоэмиссии электронов под действием плазменного резонанса в ближней и средней инфракрасной области спектра. Необходимый рельеф поверхности может быть обеспечен в гетерофазных радиационно-стойких пленках типа CdS-PbS.*

PACS: 78.30.Fs, 78.70.-g, 79.75.+g

**Ключевые слова:** вторично-ионный фотоэффект, гетерофазный пленочный полупроводник типа CdS-PbS, туннельная электронная фотоэмиссия, плазменный резонанс, характеристические потери электронов.

### Введение

В последние годы [1] понятие фотоэффекта, который был ранее связан исключительно с электронными явлениями, пополнилось понятием ионный (вторично-ионный) фотоэффект [2]. Механизм этого явления, представляющего собой подавление или усиление с помощью освещения экзоионной эмиссии, обусловлен электронными процессами в мишени. В этой статье предлагается дальнейшее расширение понятия «фотоэффект» в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне путем включения в арсенал актуальных процессов явления плазменного резонанса в полупроводниках.

### Поверхность пленки типа CdS-PbS

Величина возможной электронной экзоэмиссии на исследуемых пленках CdS-PbS зависит от рельефа поверхности, сведения о котором дают исследования на электронном микроскопе.

На фотографии рис. 1, а, сделанной во вторичных электронах, узкозонная фаза выглядит светлее фона, поскольку в ее состав входит более тяжелый элемент (свинец), который уменьшает

глубину проникновения первичных и таким образом увеличивает выход вторичных электронов. Подобная ситуация проявляется и на обратно рассеянных электронах (рис. 1, б).

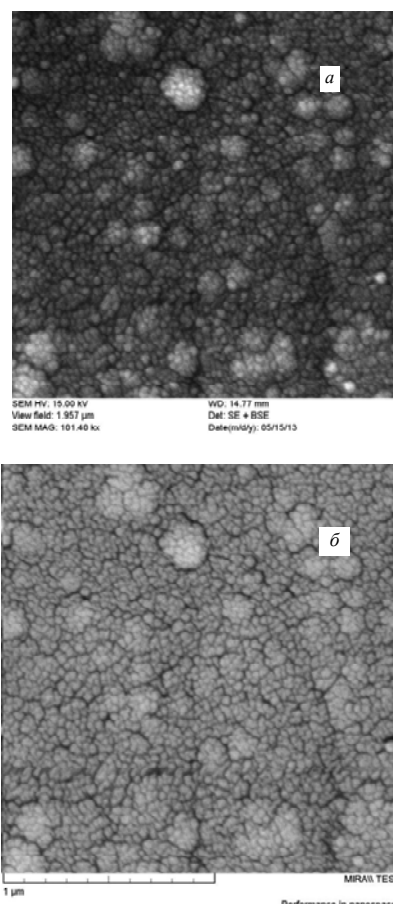


Рис. 1. Изображение поверхности пленочной мишени состава CdS(0,9)-PbS(0,1) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira II LMU в двух датчиках: а — вторичных электронов, б — обратно рассеянных электронов. Ускоряющее напряжение 15 кВ, поле зрения 2,0 мкм

Роках Александр Григорьевич, профессор.  
 Шишкин Михаил Игоревич, аспирант, инженер.  
 Вениг Сергей Борисович, профессор, декан.  
 Матасов Максим Дмитриевич, ассистент.  
 Аткин Всеволод Станиславович, аспирант.  
 Саратовский государственный университет  
 им. Н. Г. Чернышевского.  
 Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.  
 E-mail: rokakhag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 августа 2014 г.

© Роках А. Г., Шишкин М. И., Вениг С. Б., Матасов М. Д., Аткин В. С., 2014

Электронно-микроскопические фотографии пленок CdS-PbS показывают наличие на их поверхности зерен размером от сотых долей микрометра до нескольких микрометров (при использованном увеличении последние не проявляются), которые могли бы служить «остриями» для туннельной эмиссии. Эти зерна, в основном, принадлежат узкозонной фазе твердых растворов (фаза с большим содержанием сульфида свинца). Отметим, что рассматриваемые пленки [3] в отношении фотоэлектрических характеристик обладают радиационной стойкостью [4].

### О вторично-ионном фотоэффекте как аналоге туннельной фотоэлектронной эмиссии

В конце 90-х годов прошлого столетия начались систематические исследования влияния света на выход вторичных ионов кадмия, свинца и серы из пленочной мишени фотопроводящего сульфида кадмия-свинца, представляющего собой ряд ограниченных твердых растворов PbS в CdS (малая растворимость) и CdS в PbS (большая растворимость). В первом приближении пленка твердого раствора рассматривалась как двухфазная, состоящая из широкозонной фазы CdS и узкозонной PbS, хотя, строго говоря, эти фазы представляли собой не чистые сульфиды кадмия и свинца, а ограниченные твердые растворы с разной степенью растворимости компонент.

Рассматриваемое полупроводниковое соединение (CdS-PbS) сыграло роль модельного при исследовании вторично-ионного фотоэффекта (ВИФЭ) — такое название было дано обнаруженному физическому явлению.

При подсветке белым светом выход положительных вторичных ионов кадмия (в качестве первичных использовались положительные ионы кислорода, азота или аргона) уменьшался, а ионов свинца увеличивался. Разное поведение ионов кадмия и свинца [5] потребовало разработки теоретических представлений [6] о механизме протекающих процессов. Проведенные расчеты показали, что уменьшение выхода вторичных положительных ионов при освещении происходит в результате понижения приповерхностного потенциального барьера, препятствующего выходу электронов в вакуум. В результате, выход электронов увеличивается, что приводит к компенсации вторичных положительных ионов и, тем самым, к уменьшению их числа (*компенсационный механизм*). Такой эффект получил название *нормального вторично-ионного фотоэффекта*.

Увеличение выхода положительных вторичных ионов связано с *рекомбинационным механизмом*. Он заключается в том, что электронно-дырочные пары, созданные в широкозонной фазе

и затем перешедшие в узкозонную либо непосредственно в узкозонной фазе поглощенным светом, при рекомбинации выделяют энергию, вызывающую локальный нагрев кристаллитов узкозонной фазы. Именно в этой фазе, в основном, и происходит рекомбинация, в том числе и безызлучательная, облегчающая выход вторичных ионов. Подобный механизм имел место и при распылении монооксида кремния положительными ионами аргона [7]. Такой вид вторично-ионного фотоэффекта (ВИФЭ) получил название аномального.

Расширение круга полупроводниковых соединений, обнаруживающих вторично-ионный фотоэффект, привело к исследованию монокристаллов GaAs и CdTe [7]. В упомянутой статье было показано, что нормальный ВИФЭ можно сопоставить с собственной, а аномальный — с примесной фотопроводимостью. Так была подтверждена актуальность применения «полупроводникового» подхода к объяснению механизма фотоактивированного выхода вторичных ионов в вакуум к мишеням разного состава и кристалличности.

Ситуация с электронной эмиссией в инфракрасной области спектра видна на примере неохлаждаемых ПНВ с эмиссией электронов в вакуум: их продвижения в среднюю и дальнюю ИК-область спектра с использованием традиционных механизмов работы, по-видимому, не ожидается, хотя отмечается такое их важное преимущество, как практическая безынерционность [8].

В данной статье проведено предварительное исследование возможности фотоэмиссии для среднего ИК-диапазона на основе плазменного резонанса или взаимодействия плазменных резонансов, имеющих место как при воздействии ИК-излучения, так и под влиянием ускоренных электронов (характеристические потери).

### Связь с туннельной фотоэмиссией

Механизм оптического плазменного резонанса, неоднократно наблюденного в поликристаллических пленках на основе сульфоселенида кадмия или сульфида кадмия-свинца, требует дальнейшего изучения, поскольку его происхождение и спектральное положение может быть связано не только с концентрацией свободных электронов в пленочной мишени, но и с размером кристаллитов, представляющих собой наночастицы, естественно образующиеся в процессе изготовления пленок [9].

Представляется целесообразным использовать эффект взаимодействия двух видов резонансов (возникающего под действием ускоренных электронов и оптического), исследовавшихся, на-

сколько нам известно, до сих пор по отдельности (см. рис. 2).



Рис. 2. Типичный спектр характеристических потерь (вторичных) электронов вблизи энергии первичных электронов  $E_p$

При полевой (туннельной) электронной эмиссии, по свидетельству ряда авторов, тоже могут возникать плазмоны. Именно эта ситуация нуждается в дальнейших исследованиях для продвижения быстродействующих неохлаждаемых приемников излучения в среднюю ИК-область спектра.

О возможности взаимодействия двух плазменных резонансов в нашем распоряжении имеются пока косвенные свидетельства, основанные на известном подобии процессов выхода ионов и электронов с поверхности полупроводниковой мишени под влиянием ее освещения.

Если в первом случае (рост выхода вторичных ионов) речь идет о расшатывании кристаллической решетки энергией рекомбинирующих электронно-дырочных пар, созданных светом (аномальный ВИФЭ), то во втором случае выход электронов из мишени может стимулироваться плазменным резонансом свободных носителей заряда, возникающим при поглощении излучения среднего или дальнего ИК-диапазонов в зависимости от концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковой мишени [10].

С другой стороны, энергия плазмонов в спектре характеристических потерь лежит в диапазоне  $10^3$ — $10^4$  эВ и более [11, 12], что соизмеримо с энергией плазмона в оптическом плазменном резонансе при длине волны 8 мкм и *делает возможным их взаимодействие*. По этой причине повышение выхода ионов при освещении и физическая модель такого повышения (аномальный вторично-ионный фотоэффект) могут служить аналогом влияния оптического плазменного резонанса на фотоэлектронную эмиссию из полупроводника.

Продолжая аналогию с вторично-ионным фотоэффектом (физическое моделирование), заметим, что влияние оптического плазменного резонанса на выход электронов (плазменный фотоэффект) может иметь место и без взаимодействия с плазменным резонансом, возбуждаемым ускоренными электронами и проявляющимся в характеристических потерях, хотя, по-видимому, с меньшей эффективностью.

Экспериментальное подтверждение высказанных предположений пока находится на начальном этапе. Вариант наблюдения туннельной эмиссии на воздухе (при освещении видимым светом) выполнен для аналогичных пленок на туннельном микроскопе [13]. Есть основания полагать, что, по сравнению с воздухом, туннельная эмиссия в вакуум будет облегчена из-за уменьшения поверхностного потенциального барьера в сульфиде кадмия *n*-типа, связанного с кислородом, образующим акцепторную примесь.

### Выводы

1. Как показывает предварительное рассмотрение, выполненное по аналогии с исследованным нами вторично-ионным фотоэффектом, использование фотоэлектронной эмиссии из полупроводника может превратить оптический плазменный резонанс в средней ИК-области спектра в разновидность электронного фотоэффекта.

2. Гетерофазный пленочный полупроводник типа CdS-PbS вследствие радиационной стойкости и тенденции к формированию субмикронных выступов на поверхности (острия) может служить в качестве модельного вещества для экспериментального исследования влияния плазменного резонанса на выход электронов из полупроводникового фотокатода.

3. Поскольку плазменный резонанс в полупроводниках имеет место в средней ИК-области спектра при комнатной температуре, индуцированная им эмиссия электронов в вакуум может наблюдаться без специального охлаждения.

### Литература

1. Роках А. Г., Жуков А. Г., Сердобинцев А. А., Стецюра С. В. В сб.: Физика полупроводников и полупроводниковая электроника. — Саратов: Изд-во Гос. УНЦ «Колледж», 2001.
2. Роках А. Г., Стецюра С. В., Сердобинцев А. А. // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. № 1. С. 113.
3. Роках А. Г., Кумаков А. В., Елагина Н. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 4. С. 787.
4. Роках А. Г. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 13. С. 820.
5. Сердобинцев А. А., Роках А. Г., Стецюра С. В. // ЖТФ. 2007. Т. 27. № 11. С. 96.

6. Rokakh A. G., Serdobintsev A. A., Stetsyura S. V., et al., In: Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis and Applications. Ed. by J. K. Lang (N.-Y. USA, 2009). P. 325.
7. Rokakh A. G., Matasov M. D. // Physics Express. 2011. V. 1. No. 1. P. 57.
8. Бегучев В. П., Чанкевич А. Л., Филачев А. М. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 132.
9. Rokakh A. G., Shishkin M. I., Perepelitsyn Yu. N., et al. // Phys. Express. 2013. V. 3. No. 2. P. 1.
10. Роках А. Г., Кац Н. Б. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 1. С. 6.
11. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности, — М.: Наука, 2006.
12. Maier S. A. Plasmonics: Fundamental and Applications. — UK: Springer Science + Business Media, 2007.
13. Яшникова С. С., Климова С. А., Маляр И. В. и др. Тез. докл. VI конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011.

## Analogies between exoelectronic photoemission and secondary ionic photoeffect in semiconductors

A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, S. B. Venig, M. D. Matasov, and V. S. Atkin

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

Received August 11, 2014

**Earlier we have shown that the increase in yield of secondary ions from a semiconductor at illumination is connected with a loosening of the crystal lattice due to the energy of recombining electron-hole pairs in the narrow-band phase. Application of similar reasoning to electronic gas in semiconductors suggests about a possibility of the tunnel photoemission of electron under the influence of a plasma resonance in the near and middle infrared spectral region. The necessary relief of the surface can be provided in heterophase radiation-resistant films like CdS-PbS.**

PACS: 78.30.Fs, 78.70.-g, 79.75.+g

**Keywords:** secondary ionic photoeffect, heterophase film semiconductor like CdS-PbS, tunnel electron photoemission, plasma resonance, electron characteristic loss.

### References

1. A. G. Rokakh, A. G. Zhukov, A. A. Serdobintsev, et al., in Book "Physics of Semiconductors and Semiconductor Electronics" (Kolledzh, Saratov, 2001) [in Russian].
2. A. G. Rokakh, S. V. Stetsyura, and A. A. Serdobintsev, Izv. Vuzov. Prikl. Nelin. Dinamika, No. 1, 113 (2006).
3. A. G. Rokakh, A. V. Kumakov, and N. V. Elagina, Semiconductors **13**, 787 (1979).
4. A. G. Rokakh, Tech. Phys. Lett. **10**, 820 (1984).
5. A. A. Serdobintsev, A. G. Rokakh, and S. V. Stetsyura, Tech. Phys. **27**, 96 (2007).
6. A. G. Rokakh, A. A. Serdobintsev, S. V. Stetsyura, et al., in Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis and Applications. Ed. by J. K. Lang (N.-Y. USA, 2009). P. 325.
7. A. G. Rokakh and M. D. Matasov, Physics Express. **1** (1), 57 (2011).
8. V. P. Beguckev, A. L. Chapkevich, and A. M. Filachev, Prikladnaya Fizika, No. 2, 132 (1999).
9. A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, Yu. N. Perepelitsyn, et al, Phys. Express. **3** (2), 1 (2013).
10. A. G. Rokakh and N. B. Kats, Tech. Phys. Lett. **5**, 6 (1979).
11. K. Oura, V. G. Lifshits, A. A. Saranin, et al., Introduction in Physics of Surface (Nauka, Moscow, 2006) [in Russian].
12. S. A. Maier, Plasmonics: Fundamental and Applications. (UK: Springer Science + Business Media, 2007).
13. S. S. Yashnikova, S. A. Klimova, I. V. Malyar, et al., in Proc. VI Conf. Young Scientists (Saratov University, 2011) [in Russian].