

Эффект поверхностного рассеяния носителей в спектрах фотопроводимости CdS

© А.С. Батырев[¶], Р.А. Бисенгалиев^{¶¶}, Б.В. Новиков*

Калмыцкий государственный университет,
358000 Элиста, Россия

* Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 30 июля 2012 г. Принята к печати 28 августа 2012 г.)

В спектрах низкотемпературной (77 К) фотопроводимости кристаллов CdS 2-й группы, подвергнутых воздействию внешнего обогащающего поперечного электрического поля, обнаружен эффект, обусловленный рассеянием электронов на поверхности полупроводника.

1. Введение

В работах [1–4] исследовано влияние поперечного электрического поля (ПЭП) — внешнего электрического поля, приложенного к полупроводнику по методу эффекта поля (о методе эффекта поля см., например, [5]), — на спектры низкотемпературной ($T = 77$ К) красной фотопроводимости (ФП) кристаллов CdS. Показано, что воздействие на поверхность полупроводника внешним ПЭП приводит к характерным количественным и качественным изменениям этих спектров, обусловленным зависимостью скорости поверхностной рекомбинации, а следовательно, и времени жизни неравновесных носителей у поверхности полупроводника от приповерхностного изгиба электронных зон. В работе [6] в ряде кристаллов CdS обнаружен „аномальный“ характер изменений спектров красной ФП в обедняющем ПЭП, связанный с эффектами экранирования электрондырочного взаимодействия в приповерхностном слое с технологическим избытком кадмия [7,8].

В настоящей работе сообщается о наблюдении в спектрах красной ФП ряда кристаллов CdS „аномальных“ изменений с ростом внешнего обогащающего ПЭП. Предполагается их связь с рассеянием неравновесных электронов поверхностью полупроводника при их движении в приповерхностной потенциальной яме, формируемой внешним ПЭП. Предварительные результаты этих исследований были изложены в работе [9].

2. Методика эксперимента

Исследовалось влияние обогащающего ПЭП на спектры красной низкотемпературной ($T = 77$ К) ФП кристаллов CdS 2-й группы.¹ Используемые в опытах

[¶] E-mail: asbatyrev@mail.ru

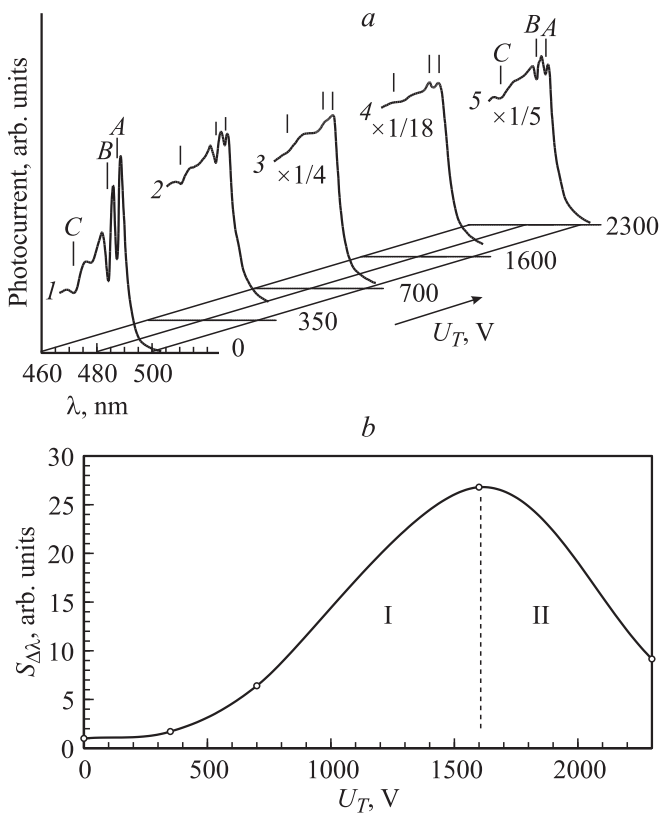
^{¶¶} E-mail: task99@mail.ru

¹ Здесь и далее мы придерживаемся общепринятой классификации [10,11] полупроводниковых кристаллов и их спектров ФП по типу наблюдаемой в спектрах ФП тонкой структуры (ТС), обусловленной экситонами. Согласно такой спектроскопической классификации ТС 1-го (2-го типа) (линиям экситонного поглощения соответствуют максимумы (минимумы) фототока) определяет 1-й (2-й) тип спектра ФП, при этом ТС 1-го (2-го) типа в спектре стационарного возбуждения ФП, измеренном при $T = 77$ К, определяет принадлежность кристалла 1-й (2-й) группе.

кристаллы представляли собой монокристаллические пластинки CdS толщиной несколько десятков микрон с гексагональной осью C в плоскости поверхности образца, выращенные из газовой фазы методом Фрехриxa, а также методом пересублимации в потоке инертного газа. Исследуемые образцы монтировались в конденсатор эффекта поля оригинальной конструкции в качестве одной из обкладок. Другой (полевой или управляющей) обкладкой конденсатора служил тонкий практически прозрачный проводящий слой двуокиси олова (SnO_2) на стекле. В качестве диэлектрика в конденсаторе эффекта поля использовалась слюдяная (мусковит) пленка толщиной ≤ 10 мкм. Электрические контакты к образцам были получены путем нанесения на их поверхность индий-галлиевой пасты. Напряжение на полевой обкладке конденсатора эффекта поля U_T изменялось с помощью высокостабилизированного источника постоянного напряжения с регулируемым выходным напряжением в диапазоне 0–2500 В. Величина тянущего (измерительного) напряжения U_M , как правило, не превышала 50 В. Фотовозбуждение образца осуществлялось непрерывным светом со стороны полевой обкладки конденсатора эффекта поля. Спектры ФП регистрировались со спектральным разрешением не хуже 8 Å в геометрии $E \perp C$, $k \perp C$ (E — электрический, k — волновой вектор световой волны) на экспериментальной установке, собранной на базе монохроматора МДР-3. Регистрирующая часть экспериментальной установки включала в себя электрометрический усилитель В7-30 или У5-9 и самопишущий потенциометр КСП-4.

3. Экспериментальные результаты

На рисунке *a* приведены спектры красной ФП образца кристалла CdS 2-й группы (см. кривую *1*) при $T = 77$ К для различных положительных значений U_T (значения U_T указаны справа от шкал λ), а на рисунке *b* представлена кривая зависимости интегральной фоточувствительности (ФЧ) $S_{\Delta\lambda}$ от U_T для этого же образца, полученная путем подсчета площадей под спектральными кривыми, приведенными на рисунке *a* (подсчет произведен с учетом масштабных множителей кривых, множитель $\times 1$ кривых *1* и *2* опущен).



a — спектры фотопроводимости образца БК-95 кристалла CdS при различных обогащающих напряжениях U_T на полевой обкладке конденсатора эффекта поля. $T = 77$ К, $\mathbf{E} \perp \mathbf{C}$, $\mathbf{k} \perp \mathbf{C}$. A, B, C — структура, обусловленная экситонами. *b* — зависимость интегральной фоточувствительности $S_{\Delta\lambda}$ образца от обогащающего напряжения.

Как видно из рисунка *a*, по мере увеличения обогащающего ПЭП происходит спектрально-неоднородный рост ФЧ образца с преобладанием эффекта в экситонных минимумах фототока и, как следствие, постепенное обесструктурирование спектральной кривой ФП (кривые 2, 3), а затем появление в ней ТС 1-го типа (кривая 4). Дальнейшее увеличение обогащающего ПЭП вызывает падение ФЧ по спектру вновь с преобладанием эффекта в области экситонных резонансов, что приводит в итоге к преобразованию ТС спектра ФП обратно во 2-й тип (кривая 5).

Таким образом, в исследованных образцах кристаллов CdS 2-й группы рост обогащающего ПЭП приводит на первом этапе к трансформации спектральной кривой ФП 2-го типа в кривую 1-го типа (кривые 1–4 на рисунке *a*) и росту интегральной ФЧ (участок I кривой на рисунке *b*), а на втором этапе — к трансформации спектральной кривой ФП 1-го типа в кривую 2-го типа (кривые 4, 5 на рисунке *a*) и падению интегральной ФЧ (участок II кривой на рисунке *b*).

Для полноты картины заметим, что в исследованных образцах воздействие обогащающего ПЭП приводило к изменению темновой проводимости полупроводника. С ростом обогащающего ПЭП темновая проводимость

сначала возрастала, а затем уменьшалась, при этом падение темновой проводимости коррелировало с падением интегральной ФЧ полупроводника.

4. Обсуждение экспериментальных результатов

Перейдем к обсуждению полученных результатов.

Как известно (см., например, [12,13]), характерной особенностью полупроводниковых кристаллов является наличие в них приповерхностного слоя пространственного заряда, экранирующего объем полупроводника от проникновения поля, создаваемого зарядом, локализованным на поверхностных состояниях. В работах [1–4] с использованием метода эффекта поля [5,12] исследована роль электрического поля этого слоя в формировании спектральных кривых ФП кристаллов CdS при низких температурах. Показано, что изгиб зон, возникающий в неоднородном приповерхностном электрическом поле слоя пространственного заряда, может определять тип спектральной кривой низкотемпературной ФП полупроводника за счет влияния на скорость поверхностной рекомбинации и, следовательно, на время жизни носителей у поверхности. Ободряющий (обогащающий) изгиб электронных зон у поверхности приводит к понижению (повышению) времени жизни свободных электронов на поверхности относительно его значения в объеме полупроводника и, как следствие, формированию спектральной кривой ФП 2-го (1-го) типа. Отсюда следует, что действие на поверхность полупроводника возрастающего по величине обогащающего (обедняющего) ПЭП может приводить к росту (падению) ФЧ и трансформации спектральной кривой ФП 2-го (1-го) типа в кривую 1-го (2-го) типа. Это находит полное подтверждение в опытах [1–4] по изучению влияния внешнего ПЭП на величину и спектральное распределение низкотемпературной краевой ФП CdS, что и позволило авторам [4] рассматривать вариации приповерхностного изгиба зон как основной фактор, определяющий наблюдаемое многообразие спектральных кривых ФП CdS, и сделать вывод о решающей роли приповерхностного изгиба электронных зон в формировании спектра краевой ФП полупроводника вследствие его влияния на время жизни электронов вблизи поверхности.

Этому выводу не противоречат изменения $S_{\Delta\lambda}$ и спектральных кривых ФП исследованных нами кристаллов CdS 2-ой группы, наблюдаемые на первом этапе воздействия обогащающего ПЭП (рисунок *b*, участок I кривой и рисунок *a*, кривые 1–4). Однако изменения $S_{\Delta\lambda}$ и спектральных кривых ФП этих кристаллов на втором этапе воздействия обогащающего ПЭП (рисунок *b*, участок II кривой, рисунок *a*, кривые 4, 5) не укладываются в рамки развитых в [4] представлений о формировании спектров краевой ФП CdS, согласно которым изменения интегральной ФЧ и ТС спектра ФП полупроводника под воздействием ПЭП определяются изменением приповерхностного изгиба зон и вызванным им изменением времени жизни электронов вблизи

поверхности. Другими словами, с точки зрения этих представлений наблюдаемые в эксперименте эффекты уменьшения ФЧ и трансформации спектральной кривой ФП 1-го типа во 2-ю с ростом обогащающего ПЭП являются „аномальными“. Обсудим природу этих „аномалий“.

Мы полагаем, что они обусловлены рассеянием неравновесных электронов поверхностью полупроводника, приводящим к уменьшению их эффективной подвижности [5,14,15].

Действительно, в монополярных полупроводниках типа CdS ФП $\Delta\sigma$ пропорциональна произведению подвижности электронов μ_n на время их жизни τ_n : $\Delta\sigma \propto \mu_n \tau_n$ (см., например, [16]). В силу больших в CdS значений коэффициента поглощения света в области экситонных и межзонных переходов ($\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$ [17]) генерация фотоносителей происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника толщиной порядка 10^{-5} см. Отсюда следует особая роль этого слоя и значений в нем параметров μ_n и τ_n в формировании спектра краевой ФП полупроводника. Изменяя внешним воздействием μ_n и τ_n в этом слое, можно радикально изменять спектральное распределение краевой ФП [1–4,6,17,18].

Существенное влияние на параметр τ_n в приповерхностном слое, а следовательно, и на спектр краевой ФП оказывает внешнее ПЭП. Согласно изложенному выше (см. также [1–4,6,11]), воздействие на поверхность кристалла CdS 2-й группы нарастающим по величине обогащающим ПЭП приводит к трансформации обедняющего изгиба зон вблизи поверхности в обогащающий и росту τ_n у поверхности до значений, превышающих объемные значения. В результате ФЧ кристалла полупроводника возрастает, а его спектральная кривая ФП преобразуется из 2-го типа в 1-й (рисунок *b*, участок I кривой, рисунок *a*, кривые 1–4). При дальнейшем увеличении обогащающего ПЭП у поверхности полупроводника возникает потенциальная яма с шириной, сравнимой с длиной свободного пробега электронов. В результате появляется дополнительное рассеяние электронов на поверхности, приводящее к уменьшению их подвижности и соответственно падению интегральной ФЧ полупроводника и изменению типа его спектральной кривой ФП с 1-го на 2-й (рисунок *b*, участок II кривой, рисунок *a*, кривые 4, 5). Заметим, что перемена типа спектральной кривой ФП обусловлена большими значениями коэффициента поглощения на резонансных частотах возбуждения экситонов, существенно (в разы!) превышающими его значения на нерезонансных частотах в окрестности края поглощения [17], в результате чего наиболее сильно рассеиваются носители, рожденные через экситонные состояния.

Полученные результаты указывают на то, что в области больших обогащающих приповерхностных изгибов зон падение μ_n за счет поверхностного рассеяния (а не рост τ_n за счет подавления рекомбинационных процессов на поверхности [4]) может стать определяющим фактором в формировании спектральной кривой ФП полупроводника.

В пользу предложенной интерпретации обсуждаемой спектральной „аномалии“ свидетельствует и наблюдавшееся в ряде образцов CdS 2-й группы существенное падение темновой проводимости в области положительных значений U_T , близких к значениям, определяемым электрической прочностью диэлектрика конденсатора эффекта поля.

5. Заключение

Таким образом, в данной работе впервые обнаружено проявление поверхностного рассеяния носителей тока (электронов) в спектрах ФП кристаллов CdS. Дальнейшее детальное исследование этого эффекта может дать ценную информацию о состоянии и свойствах поверхности полупроводника.

Список литературы

- [1] K. Colbow, A. Jmaeff, K. Yuen. *Can. J. Phys.*, **48**(1), 57 (1970).
- [2] А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев, С.Р. Григорьев, Н.В. Карасенко, Б.В. Новиков, Е.В. Сумьянова. *Вестн. СПбГУ*, **1**(4), 125 (1996).
- [3] А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев, О.Э. Ботов, Н.В. Карасенко, Б.В. Новиков, Е.В. Сумьянова. *ФТТ*, **40**(5), 941 (1998).
- [4] А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев, Н.В. Жукова, Б.В. Новиков, Э.И. Читыров. *ФТТ*, **45**(11), 1961 (2003).
- [5] А.В. Ржанов. *Электронные процессы на поверхности полупроводников* (М., Наука, 1971).
- [6] А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев, И.В. Кормильцев, Б.В. Новиков. *Сб.: Актуальные проблемы современной физики и математики* (Элиста, Изд-во Калм. ун-та, 2010) с. 59.
- [7] J.G. Gay. *Phys. Rev. B*, **4**(8), 2567 (1971); *Phys. Rev. B*, **6**, 4884 (1972).
- [8] J.A. Bragagnolo, C. Wright, K.W. Boer. *Phys. Status Solidi A*, **24**, 147 (1974).
- [9] А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев, Б.В. Новиков. *Тр. XII междунар. конф. Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы* (Ульяновск, Изд-во УлГУ, 2010) с. 74.
- [10] Е.Ф. Гросс, Б.В. Новиков. *ФТТ*, **1**(3), 357 (1959).
- [11] В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко. *Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников* (СПб., Изд-во СПбГУ, 2003).
- [12] С. Мориссон. *Химическая физика поверхности твердого тела* (М., Мир, 1980).
- [13] Ф. Бехштедт, Р. Эндерлайн. *Поверхности и границы раздела полупроводников* (М., Мир, 1990).
- [14] J.R. Schrieffer. *Phys. Rev.*, **97**(3), 641 (1955).
- [15] В.Ф. Гантмахер, И.Б. Левинсон. *Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках* (М., Наука, 1984).
- [16] З.И. Кирьяшкина, А.Г. Роках, Н.Б. Кац и др. *Фотопроводящие пленки (типа CdS)* (Саратов, Изд-во Сарат. ун-та, 1979).
- [17] J. Voigt, E. Ost. *Phys. Status Solidi*, **33**, 381 (1969).
- [18] J.A. Bragagnolo, K.W. Boer. *Phys. Status Solidi A*, **21**, 291 (1974).

Редактор Т.А. Полянская

Surface scattering effect of charge carrier in CdS photoconductivity spectra

*A.S. Batyrev, R.A. Bisengaliev, B.V. Novikov**

Kalmyk state university,
358000 Elista, Russia

* St. Petersburg state university,
198904 St. Petersburg, Russia

Abstract In the low temperature (77 K) photoconductivity spectra of class II CdS crystals subjected to influence of the external enriching transverse electric field effect due to scattering of electrons on the surface of semiconductor is found.