

05;06

## Захват электронов дислокациями в сверхвысокочастотном поле в сульфидах цинка и кадмия

© Б.М. Горелов

Институт химии поверхности НАН Украины, Киев

E-mail: user@surfchem.freenet.kiev.ua

Поступило в Редакцию 13 июля 2004 г.

Показано, что действие импульсного сверхвысокочастотного поля стимулирует туннельный захват электронов дислокациями и обратимые преобразования дефектов в широкозонных соединениях сульфидов цинка и кадмия.

Известно [1–3], что в ультразвуковом диапазоне частот в соединениях сульфидов кадмия и цинка возможно возбуждение возвратно-поступательного движения дислокаций, которое сопровождается туннельным захватом электронов с локальных центров, перезарядкой, перестройкой и генерацией дефектов. При этом имеют место обратимые и необратимые изменения в спектрах фотопроводимости и люминесценции, которые определяются характером движения дислокаций и подвижностью дефектов. Генерация и необратимые реакции дефектов характерны для движения дислокаций с отрывом от стопоров в области пластической деформации при амплитуде напряженности электрического поля  $E_a \approx 10^4 - 10^5$  V/m. В области упругих деформаций имеет место ионизация глубоких центров в поле дислокаций. Можно предположить, что в сверхвысокочастотном электромагнитном поле с  $E \geq E_a$  в кристаллах ZnS и CdS возможны ионизация и превращения дефектов, стимулированные полями движущихся дислокаций.

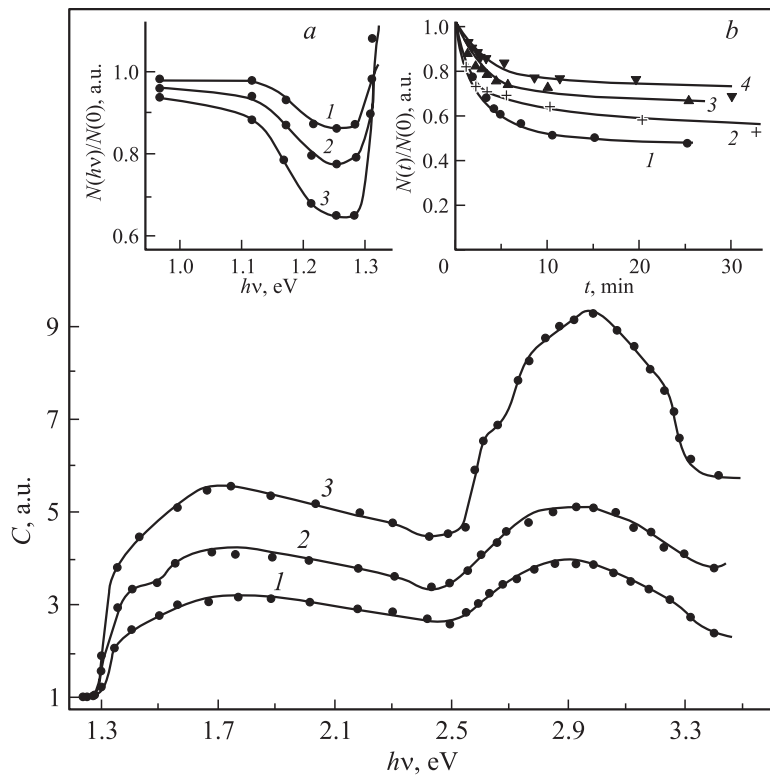
В настоящей работе исследованы ионизации и превращения дефектов, обусловленные движением дислокаций под действием сверхвысокочастотного поля. Изучали специально нелегированные высокоомные монокристаллы ZnS кубической симметрии и CdS с темновым сопротивлением при комнатной температуре соответственно  $10^{10}$  и  $10^7 - 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ . Для измерений образцы готовились в виде параллелепипедов с размерами  $2 \times 2 \times 7$  mm (ZnS) и  $5 \times 5 \times 0.5$  mm (CdS). В образцы дислокации

специально не вводились. Образцы облучались электромагнитным излучением частотой 9.4 GHz, мощностью импульсов  $10^4$  W, длительностью  $2.5 \mu\text{s}$ , частотой повторений 400 Hz и средней мощностью 10 W при комнатной температуре в темноте и помещались в пучность электрического поля проходного резонатора. В ZnS изучались спектры электронного парамагнитного резонанса локальных центров  $\text{Cr}^+$  и  $\text{Mn}^{2+}$  с помощью установки РЭ-1306, совмещенной с лампой с галогеновым наполнением при 300 K, и в CdS — спектры фотопроводимости при 77 K до и после облучения.

В спектре электронного парамагнитного резонанса ZnS наблюдаются известные линии  $\text{Cr}^+$  и  $\text{Mn}^{2+}$  [4]. Сверхвысокочастотное облучение приводит к уменьшению интенсивности линии  $\text{Cr}^+$  и не влияет на линию  $\text{Mn}^{2+}$ . Изменений ширины,  $g$ -фактора линии  $\text{Cr}^+$  не обнаружено. Центры  $\text{Cr}^+$  являются акцепторами, глубину уровня которых можно определить из спектров возбуждения и гашения сигнала парамагнитного резонанса (рис. 1). Спектр в интервале энергий  $h\nu \geq 1.35$  eV характеризует распределение уровней дефектных состояний в запрещенной зоне, с которых электроны забрасываются светом в зону проводимости и после захвата ионами  $\text{Cr}^{2+}$  увеличивают число  $\text{Cr}^+$  (рис. 1, кривая 1). Спектр гашения при  $h\nu < 1.35$  eV соответствует ионизации  $\text{Cr}^+ \rightarrow \text{Cr}^{2+}$  за счет перехода электрона в зону проводимости, а минимум  $N(h\nu)$  на глубине 1.29 eV от дна зоны проводимости — оптической глубине уровня  $\text{Cr}^+$  (рис. 1, вставка *a*). Действие сверхвысокочастотного поля понижает концентрацию  $\text{Cr}^+$  и меняет весь спектр дефектных состояний в запрещенной зоне. Так, двукратное облучение по 10 min повышает интенсивность возбуждения и меняет форму спектра, что указывает на появление новых дефектных состояний в спектре. Кроме того, полоса гашения уширяется и минимум полосы смещается до 1.24 eV (вставка *a*, кривые 2, 3).

Кинетика изменения темновой концентрации  $\text{Cr}^+$  при воздействии поля приведена на рис. 1, вставка *b*. Действие облучения понижает число центров  $\text{Cr}^+$ . С ростом времени облучения интенсивность ионизации  $\text{Cr}^+ \rightarrow \text{Cr}^{2+}$  падает. При понижении начальной темновой концентрации  $\text{Cr}^+$  интенсивность ионизации усиливается, а с уменьшением мощности облучения — падает (вставка *b*, кривые 1–4).

В темноте после прекращения облучения число центров  $\text{Cr}^+$  не меняется, что показывает туннельный механизм ионизации  $\text{Cr}^+ \rightarrow \text{Cr}^{2+}$ . Количество  $\text{Cr}^+$  восстанавливается после освещения образца монохроматическим светом из области возбуждения, тогда как спектр



**Рис. 1.** Спектры возбуждения и гашения (вставка *a*) электронного парамагнитного резонанса  $\text{Cr}^+$  до (1) и после сверхвысокочастотного облучения в течение 10 (2) и 20 (3) min. На вставке *b* — кинетика ионизации  $\text{Cr}^+$  при начальной интенсивности линий  $I(1) < I(2) < I(3) = I(4)$  (кривая 4 получена при 10%-ном ослаблении мощности).

возбуждения релаксирует после освещения светом из разных областей спектра возбуждения.

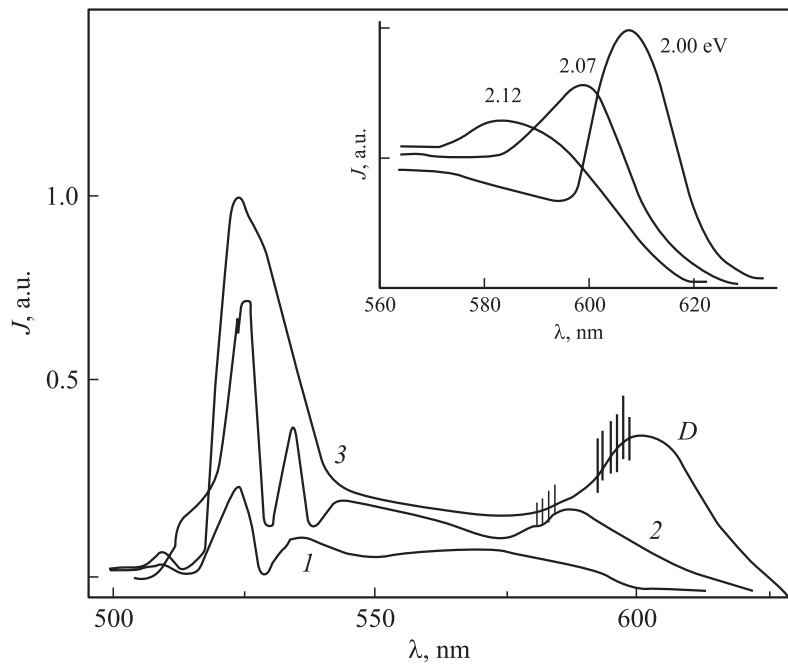
Таким образом, в мощном сверхвысокочастотном поле имеют место туннельная ионизация глубоких центров и изменение спектра всех дефектных состояний в запрещенной зоне. Так как непосредственная ионизация глубоких центров под действием электромагнитного и индуцированного пьезополя маловероятна, то ионизация  $\text{Cr}^+ \rightarrow \text{Cr}^{2+}$

обусловлена туннельным захватом электрона на уровень дислокации. При этом центры  $\text{Cr}^+$ , по-видимому, являются стопорами, которые закрепляют дислокации, так как повышение темновой концентрации  $\text{Cr}^+$  ослабляет интенсивность ионизации. Действие облучения подобно влиянию движущихся дислокаций на спектр дефектов в ультразвуковом поле.

Рост интенсивности спектра возбуждения  $\text{Cr}^+$  свидетельствует об увеличении числа дефектных состояний в запрещенной зоне, тогда как обратимость изменений спектра указывает, что генерации дефектов и необратимой перестройки дефектов при электромагнитном облучении не происходит. Обратимую трансформацию спектра дефектов можно связать с изменением числа экранирующих и других дефектов (включая  $\text{Cr}^{2+}$ ), которые захватывают электроны и участвуют в перезарядке  $\text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Cr}^+$ , при заполнении и опустошении дислокационных уровней, когда меняются электрическое поле ядра дислокаций, дислокационный барьер, размеры областей пространственного заряда дислокаций и зон, обедненных электронами [5].

Связь степени заполнения дислокационных уровней и числа дефектных состояний в запрещенной зоне под действием сверхвысокочастотного поля проявляется в CdS. Так, исходный спектр фототока характеризуется двумя узкими слабыми полосами с максимумами  $\lambda_m \approx 522$  и  $533$  nm и широкой с максимумом  $570$  nm. После действия поля в течение  $t < 15$  min ярко проявляется дислокационная полоса  $D$  с  $\lambda_m \approx 585$  nm, интенсивность которой растет с увеличением времени облучения. Рост интенсивности сопровождается смещением максимума полосы  $D$  в сторону меньших энергий и усилением дислокационных шумов (рис. 2, вставка). Одновременно с эволюцией дислокационной полосы усиливаются две узкие полосы, которые с ростом  $t$  сливаются в одну с  $\lambda_m \approx 522$  nm (рис. 2, кривые 2, 3).

Изменения спектра фототока под действием внешнего поля обратимы. Если длительность облучения  $t < 15$  min, то после отключения поля спектр восстанавливается при освещении образца светом с длиной волны  $\lambda \leq 522$  nm, когда гасятся три полосы фототока. В темноте рост длительности, когда  $t \approx 15$  min, ведет к гашению полосы  $D$  и связанных с ней двух полос в области  $\lambda < 540$  nm и восстановлению исходного спектра. Облучение с  $t > 15$  min повторяет наблюдаемый эффект. Обратимость спектра фототока связана с опустошением дислокационного уровня на свету и в темноте и указывает, что образования и перестройки дефектов под действием внешнего поля не происходит.



**Рис. 2.** Спектры фототока до (1) и после сверхвысокочастотного облучения в течение 5 (2), 10 (3), 15 (1) min. На вставке — эволюция полосы *D* и ее максимума после трехкратного облучения по 5 min. Вертикальные штрихи показывают дислокационные шумы при регистрации полосы *D*.

Смещение дислокационной полосы в сторону меньших энергий указывает, что дислокационный барьер при захвате электронов дислокацией понижается, так как положение уровня *D* по мере заполнения определяется результатом наложения смещения уровня дислокации к валентной зоне и приближения ко дну зоны проводимости из-за понижения барьера.

При освещении восстановление спектра фототока связано с рекомбинацией электронов, захваченных дислокациями, и дырок, которые появляются в валентной зоне при возбуждении светом электрона в зону проводимости с двух уровней дефектов или валентной зоны. В темноте при действии поля спектр фототока релаксирует, когда по мере заполнения уровень дислокации, смещаясь ко дну зоны проводимости,

мости на глубину менее 2.00 eV (с учетом величины дислокационного барьера [5]), сближается с уровнем  $r$ -центров на глубине  $E \geq 1.4$  eV [6]. При захвате электронов с уровня  $r$ -центров в валентной зоне создаются дырки, которые рекомбинируют с электронами, захваченными дислокациями. Опустошение дислокационного уровня ведет к восстановлению исходного спектра.

Поведение спектра дефектных состояний под действием сверхвысокочастотного поля обусловлено изменением заполнения уровня дислокаций захваченными электронами. По мере заполнения уменьшается область истощения электронами вблизи дислокаций и растет число дефектов, расположенных вне областей истощения, которые захватывают электроны и проявляются в спектрах возбуждения  $\text{Cr}^+$  и фототока. Рост числа заряженных дефектов и усиление связанных с ними полей приводит к размытию и смещению уровней дефектов, что проявляется в слиянии полос возбуждения фототока и изменении формы спектров фототока и возбуждения  $\text{Cr}^+$ .

Таким образом, в соединениях ZnS и CdS действие сверхвысокочастотного поля стимулирует возвратно-поступальное движение дислокаций, которое сопровождается туннельной ионизацией глубоких центров и обратной трансформацией спектра дефектных состояний. Преобразование дефектов связано с обратимой вариацией числа дефектов, расположенных вне областей пространственного заряда дислокаций и участвующих в возбуждении  $\text{Cr}^+$  и фототока, при изменении степени заполнения и размера области пространственного заряда дислокаций под действием поля и света.

## Список литературы

- [1] *Островский И.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. № 8. С. 463–466.
- [2] *Громашевский В.Л., Дякин В.В., Сальков Е.А.* и др. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 4. С. 550–554.
- [3] *Горелов Б.М., Коротченко О.А., Островский И.В., Шейнман М.К.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 21. С. 1315–1320.
- [4] *Омельченко С.А., Буланый М.Ф., Хмеленко О.В.* // ФТТ. 2003. Т. 45. № 9. С. 1308–1313.
- [5] *Матаре Г.* Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. 464 с.
- [6] *Бьюб Р.* Фотопроводимость твердых тел. М.: ИЛ, 1962. 557 с.