

Ю. Н. КАРАКИС, В. А. БОРЩАК, Н. П. ЗАТОВСКАЯ, В. В. ЗОТОВ, М. И. КУТАЛОВА,  
А. П. БАЛАБАН

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, ул. Пастера, 42; тел. 23-34-61.  
E-mail: ndi\_lepikh@gmail.com.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ УСТРОЙСТВЕ

Исследуются особенности релаксации фототока в кристаллах сульфида кадмия с запорными контактами, являющихся основой полупроводникового устройства, которые связаны с пространственным перераспределением *S*- и *R*-центров. Обнаруженные закономерности дают возможность создавать фотоэлектронные приборы, использующие рассмотренные процессы.

Стабильность работы полупроводниковых приборов является одним из определяющих факторов в оценке их практической ценности. Однако процессы старения и деградации контактов могут служить одним из источников дестабилизации работы всего устройства. Вопрос о поведении образцов с заведомо запорными, но стабильными контактами, как и пути использования таких элементов, все еще остается открытым, несмотря на их большую распространенность.

На монокристаллических образцах сульфида кадмия с запорными контактами, являющихся основой полупроводникового устройства при подаче напряжения 50 В при расстоянии между контактами 0,5 мм и возбуждающем свете из максимума кривой спектрального распределения тока (520 нм) нами наблюдалась релаксация фототока в течение десятков минут, которая зависела от времени предварительной выдержки в темноте (рис. 1). Вид кривых не зависел от полярности приложенного напряжения (но для всех трех представленных случаев — одинаковой).

Видно, что после длительного пребывания в равновесных условиях (в темноте) (кривая *a*) кристалл обладал сравнительно невысокой чувствительностью. Однако, после воздействия света (при снятии кривой *a*) независимо от длительности последующих темновых промежутков, фотоответ возрастал. При этом существовал некоторый предельный уровень очувствления, превысить который не удавалось.

Вид кривой релаксации зависел от величины напряженности приложенного поля. Причем, если уменьшение приложенного напряжения не вносило принципиальных изменений в форму кривой, лишь уменьшая соответствующие токи, то увеличение расстояния между контактами до 2 мм, при смещении на образце по-прежнему 50 В, приводило к изменению начальной стадии изменений — при малых временах меньших 10 мин появлялся участок сравнительно медленного увеличения тока и релаксационная кривая в целом приобретала *S*-образный вид.

Характерно, что при этом, хотя напряженность приложенного поля уменьшалась примерно

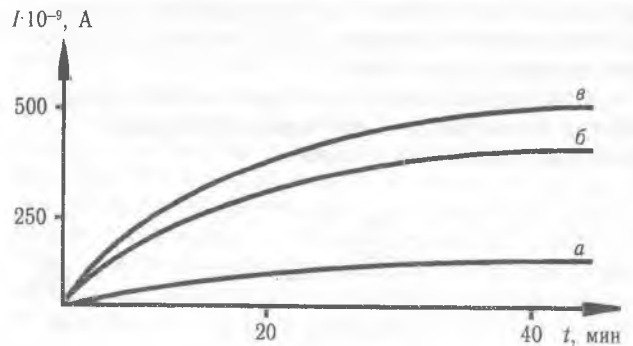


Рис. 1. Релаксация фототока после выдержки в темноте в течение 3 месяцев (кривая *a*), пяти суток после последней засветки (*б*) и двух дней после предыдущего освещения (*в*)

вчетверо, величина протекающего тока убывала непропорционально, составляя примерно половину от исходного значения на участке насыщения после релаксации в 35—40 минут.

Описываемые кривые релаксации близки к кривым, представленным в [1], где также исследовались кристаллы сульфида кадмия, но с омическими контактами. Интерпретация авторов основана на наличии в кристалле центров медленной и быстрой рекомбинации *R*- и *S*-центров [2] и миграцией *S*-центров в объеме кристалла. Для подтверждения наличия в наших кристаллах также *R*- и *S*-центров мы исследовали эффект инфракрасного гашения фототока, который был значительным. Даже при не очень больших величинах отношения интенсивности гасящего света к интенсивности возбуждающего, значение коэффициента ИК гашения *Q* легко достигало 100%. Кривая спектрального распределения *Q*( $\lambda$ ) имела вид с двумя максимумами в области 1130 и 1380 нм. Наличие двух максимумов соответствует стандартной модели Роуза с *R*- и *S*-центрами.

Второй максимум в районе 1400 нм (0,9 эВ) соответствует возбужденному состоянию центров медленной рекомбинации. Поведение центров в этом состоянии аналогично обычному *R*-каналу рекомбинации. Полученные величины энергий активации — 1,1 эВ и 0,9 эВ совпадают с указанными в литературе.

При интенсивностях света от  $6 \cdot 10^{13}$  квант·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> до  $13,5 \cdot 10^{13}$  квант·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> на изучаемых образцах наблюдалось температурное гашение фототока, начиная с температур 315—325 К. В нашем случае энергия составляла 1,09 эВ, а  $S_{p2}/S_{n2} = 9,8 \cdot 10^4$ . Полученные значения энергии и отношение сечений захватов соответствуют параметрам центров медленной рекомбинации (*R*-центров).

Присутствие обоих видов гашения свидетельствует о наличии в изучаемых кристаллах *S*- и *R*-центров соизмеримых концентраций, причем абсолютное значение количества центров каждого класса должно быть значительным.

Для построения модели, объясняющей наблюдаемую нами релаксацию был поставлен специальный эксперимент. После завершения процесса релаксации уже в очувствленном состоянии (кривая *в* рис. 1) полярность приложенного поля изменялась на противоположную. Если, согласно [1], наблюдаемые явления связаны с миграцией в образце заряженных на свету дефектов, играющих роль центров быстрой рекомбинации (*S*-центров) и постепенным накоплением их у анода, то следовало ожидать следующих процессов.

При изменении знака тянущего поля (свет продолжает действовать и, значит, центры сохраняют зарядовое состояние) дефекты должны мигрировать в обратную сторону. За время, сравнимое со временем предыдущей релаксации, они вначале рассеиваются по кристаллу (за счет разброса подвижностей и флуктуаций диффузионных перескоков вакансий  $V_{Ca}^-$ ). При этом образец возвращается в пререлаксационное состояние с низкой чувствительностью. А затем, еще за такой же промежуток времени происходит пространственная переполяризация *S*-центров со скоплением их у противоположного контакта.

Вместо этого нами наблюдалось незначительное изменение фототока в течение 20—25 минут не большее 10—20% от исходного значения. Учитывая медленный процесс перемещения *S*-центров через кристаллическую решетку, подобные временные промежутки не соответствуют процессу диффузии дефектов этого типа.

Таким образом, наблюдаемые особенности переполяризации требуют исключить из рассмотрения в нашем случае движение *S*-центров.

Были проведены исследования влияния температуры на процесс релаксации фототока образца, находящегося в состоянии *в* рис. 1. Результаты представлены на рис. 2.

Кривая *а* здесь измерена при комнатной температуре. Она соответствует зависимости *в* рис. 1 и снята в тех же условиях. С повышением температуры процесс релаксации ускорялся. Однако представляется аномальным практически отсутствие различий в изменении графиков в диапазоне температур от 290 до 360 К.

Повышение температуры оказалось эффективным способом возвращения кристаллам сульфида кадмия фоточувствительности. Даже после длительной выдержки в темноте (случай *а* рис. 1) в результате последующего прогрева (без фотовозбуждения и напряжения) при тем-

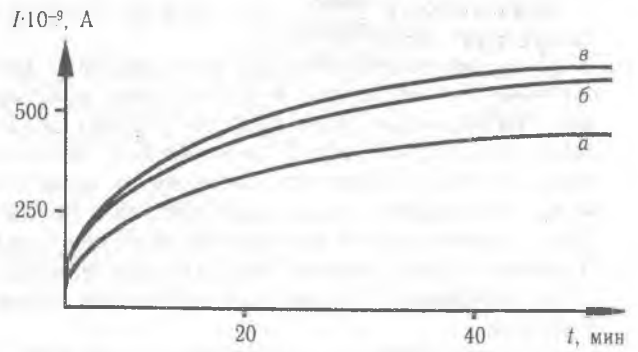


Рис. 2. Релаксация фототока при  $t = 295$  К (*а*),  $t = 310$  К (*б*) и  $t = 360$  К (*в*)

пературе 315 К в течение 8—10 часов кристалл переходил в состояние, характерное для зависимости *в* рис. 1. При этом роста фоточувствительности от фотовоздействия не наблюдалось. Однако и в этом случае нам не удалось простым увеличением температуры добиться улучшения перевода образца в состояние с повышенной фоточувствительностью.

Воздействие на наши кристаллы инфракрасного света также повышало их фотоответ на возбуждение собственным светом после долгого пребывания в темноте.

Кривые вольтамперных зависимостей изучаемых кристаллов имели вид, типичный для обратных ветвей диодов. Причем речь идет об обоих контактах, поскольку при противоположных полярностях прикладываемого напряжения не наблюдается принципиальных отличий. Оба контакта на краях образца создают неомические переходы с барьерами, направленными внутрь полупроводника (рис. 3).

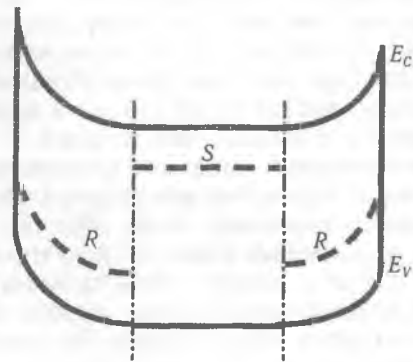


Рис. 3. Зонная диаграмма к эффекту релаксации тока в кристаллах CdS с *R*- и *S*-центрами и запорными контактами

При исследовании емкостных характеристик прямолинейные участки вольтфарадных зависимостей наблюдались нами только при значительных напряжениях обоих знаков. В целом графики имели *U*-образный вид. Измерения проводили в течение времени, исключающего диффузию примесей (минуты). Наличие вольтфарадной зависимости и ее симметричность подтверждает (наряду с исследованием ВАХ) существование пары запорных барьеров, направленных друг к другу.

Совокупность полученных данных получила следующую интерпретацию.

Прямыми экспериментами нами доказано присутствие  $S$ - и  $R$ -центров в исследуемых кристаллах. Наблюдаемые длительности токовых релаксаций исключают чисто электронные истолкования. В тоже время эти промежутки слишком малы, как показано выше, для участия в процессах центров быстрой рекомбинации ( $S$ -центров). Поэтому в рассмотрении вводятся концентрационные изменения для центров медленной рекомбинации.

По своей природе центры медленной рекомбинации — это ионы меди в решетке сульфида кадмия [2]. Многочисленные исследования указывают на сравнительно большую подвижность меди в  $CdS$ . Авторы численным расчетом показали, что для наблюдаемого экспериментально скачка времени жизни основных носителей до пяти порядков, очувствляющие  $R$ -центры должны быть заряжены положительно. Кроме этого, избыток дырок на них непосредственно следует из значительно большей величины их сечения захвата, чем для электронов.

И без приложенного напряжения в кристаллах  $CdS$  величины электрических полей барьеров могут достигать  $10^5$  В/см [1]. Нами показано наличие запирающих областей пространственного заряда на контактах. Очевидно, что для зазоров небольшого размера (в нашем случае 0,5 мм) эти барьеры Шоттки играют определяющую роль. В отдельных ситуациях они могут даже перекрываться.

В темноте  $R$ -центры захватывают неосновные носители и полем барьеров подтягиваются к контактам. При этом они своим зарядом уменьшают здесь напряженность поля. Спустя какое-то время картина стабилизируется.

В целом кристалл при этом высокоомный, поскольку в центральной его части из-за переизбытка центров быстрой рекомбинации время жизни основных носителей мало, а приконтактные области истощены электронами.

При включении внешнего напряжения роль  $R$ -центров у контактов оказывается различной. Пусть поле направлено таким образом, что заставляет заряженные  $R$ -центры двигаться справа налево. Тогда у левого контакта концентрация центров увеличивается и они должны были бы понизить высоту этого барьера. Но одновременно, поскольку его напряженность совпадает с внешним полем, он должен повышаться. Из-за этой конкуренции происходящие здесь изменения практически не сказываются на релаксации тока фотовозбужденных носителей.

Значительно большее влияние при этом оказывает изменение концентрации центров у правого контакта. Внешнее поле вытягивает очувствляющие центры из этой области в среднюю часть кристалла, существенно увеличивая здесь время жизни основных носителей. Это проявляется в виде релаксации тока. Оставаясь небольшим из-за заборных контактов, он тем не менее возрастает от  $10^{-10}$ — $10^{-9}$  А к  $10^{-7}$  А (рис. 1). Поскольку барьеры примерно симметричные,

эффект нечувствителен к знаку приложенного напряжения. При смене полярности левый и правый барьер меняются ролями.

Этим же объясняется индифферентность величины фототока к знаку поля после окончания релаксации. Небольшой спад тут может быть связан с тем, что часть свободных  $R$ -центров из средней полосы кристалла (рис. 3) быстрее уходит к своему контакту, чем им на смену приходят удерживаемые полем  $R$ -центры из противоположной потенциальной ямы.

Понятно, что чем больше длина центральной части, тем меньшее влияние оказывает на нее полевая инжекция очувствляющих центров особенно в начальные периоды времени, пока концентрация дополнительных  $R$ -центров здесь невелика.

Имея глубину залегания около 1 эВ  $R$ -центры способны при комнатной температуре длительно удерживать захваченные неравновесные дырки. Этим, очевидно, определяются процессы перераспределения концентраций очувствляющих центров после выключения света (рис. 1), если время пребывания в темноте было не слишком долгим. Мы наблюдаем это как некоторое «запоминание» кристаллом предыдущих воздействий. Последующая релаксация оказывается более быстрой (кривые б и в рис. 1). При этом предельная отрелаксированная чувствительность к внешнему воздействию ограничивается концентрацией  $R$ -центров. В рамках нашей модели никакой комбинацией воздействий на кристалл нельзя повысить его проводимость, если уже задействованы все очувствляющие центры из соответствующей приконтактной области, которые могли принять участие в этих процессах (кривая в рис. 1). Естественно, нагрев повышает подвижность центров и ускоряет релаксацию. Однако с ростом температуры появляется конкурирующий процесс — из-за термоопустошения ловушек, часть  $R$ -центров, теряя заряд, перестает реагировать на внешнее поле.

То же действие производит ИК-излучение. Этим объясняется способность его в комбинации с небольшим нагревом возвращать кристаллам чувствительность.  $R$ -центры в этих условиях занимают центральную часть кристалла, очувствляя ее, вследствие обычных механизмов диффузии из-за градиентов концентраций от контактов к центру.

Скачки тока в начальные моменты имеют различную природу. При предварительном воздействии на кристалл полем в темноте мы понижаем высоту того барьера, напряженность у которого противоположна внешней. Он оказывается больше не в состоянии удерживать  $R$ -центры в потенциальной яме и происходит очувствление части кристалла. Если кристалл подвергается освещению без поля, в обеих приконтактных областях пространственного заряда появляются  $R$ -центры, захватившие фотовозбужденные дырки. Поскольку своим зарядом они понижают удерживающие их напряженности внутренних полей, происходит экстракция избытков с соответствующим очувствлением.

В рамках предлагаемой модели поддается интерпретации поведение емкости образца в темноте которая состоит из последовательно включенных емкостей обоих барьеров. В зависимости от направления поля при освещении, в одном из них концентрация  $R$ -центров практически не изменялась. Поэтому после прекращения возбуждения его емкость быстро возвращается в равновесное состояние. Для другого барьера потребуется значительное время, чтобы туда вернулись  $R$ -центры, удаленные на свету. По мере этого процесса барьер сужается, его емкость возрастает. Если принять, что емкости обоих барьеров равны, то после достижения равновесия их суммарная емкость будет вдвое меньше.

Таким образом, наблюдаемые нами особенности релаксации фототока в исследуемых кристал-

лах с запорными контактами связаны с пространственным перераспределением  $S$ - и  $R$ -центров. Обнаруженные закономерности дают возможность создавать фотоэлектронные приборы, использующие рассмотренные процессы.

### Литература

1. Каракис К. Ю., Борщак В. А., Зотов В. В., Куталова М. И. Релаксационные характеристики кристаллов сульфида кадмия с ИК-гашением фототока // Фотоэлектроника. — № 11. — 2002. — С. 51—54.
2. Каракис Ю. Н., Василевский Д. Л., Морено К., Сердюк В. В. Влияние зарядового состояния центров рекомбинации на фоточувствительность полупроводников: Известия АН СССР. Неорганические материалы. — 1988. — Т. 24. — С. 1208—1210.
3. Борщак В. А., Затовская Н. П., Зотов В. В., Каракис Ю. Н., Куталова М. И. Особенности взаимодействия ловушек и носителей с реальными скоростями // Фотоэлектроника. — 2000. — Вып. 9. — С. 94—97.