

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$

Н. А. Дрокин, Ш. М. Ганиев, В. М. Попел

Фотоэлектрические явления в полупроводниках обычно рассматриваются как динамический процесс установления стационарного состояния с учетом темпов генерации и рекомбинации неравновесных фотоносителей [1]. В зависимости от микроскопических механизмов, протекающих при поглощении света в веществе, процессы генерации и рекомбинации бывают линейными, квадратичными, кубическими, однако существуют и более сложные нелинейные процессы, приводящие к специфическим явлениям, которые отражают особые свойства материала.

В данной работе сообщается о наблюдении нелинейной динамики поведения фототока в магнитных полупроводниках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , непосредственно не связанной с нелинейными процессами рекомбинации, а возникающей в результате неоднородного освещения поверхности и особенностей фотодиффузионных процессов.

Подготовка образцов для фотоэлектрических измерений состояла в том, что использовались свежесколотые поверхности монокристаллов, которые отжигались в атмосфере Cd в течение 5—6 ч при  $T=350$  С для получения проводимости  $n$ -типа за счет создания дефицита по халькогену. При механической или химической обработке кристаллов наблюдалась, как и в работе [2], сильная зависимость электрофизических свойств от состояния поверхности. При раскалывании кристаллов поверхность получается, как правило, неровной, но она обладает зеркальным блеском, монолитна и не содержит видимых трещин или других дефектов. К таким отожженным поверхностям скола точечной микросваркой припаивались два серебряных микропровода на расстоянии 0.5 мм друг от друга, и затем образец включался в обычную измерительную электрическую цепь, содержащую источник питания (1—10 В) и последовательно включенный нагрузочный резистор, сигнал с которого, пропорциональный изменению тока при освещении, подавался на самописец или осциллограф. Фиксировалось временное поведение фототока при изменении энергии света (рис. 1) и температуры (рис. 2) после включения и выключения света и интенсивности  $\sim 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

В качестве образцов использовались монокристаллы  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , легированные 1 вес. % In. После отжига в атмосфере Cd электросопротивление составляло величину  $R \sim 10^5$  Ом·см. Температурная зависимость электросопротивления имеет характерный максимум вблизи температуры Кюри  $T_c=130$  К [3]. В соответствии со спектральными данными [4] началу оптических переходов из валентной зоны в зону проводимости соответствует энергия 1.4 эВ. При энергиях 1.2—1.4 эВ оптические переходы связываются с возбуждением уровней магнитоактивных ионов хрома или примесей вблизи дна зоны проводимости.

В описанных условиях эксперимента было обнаружено, что в парамагнитной фазе при включении освещения с энергией 1.3 эВ исходный темновой ток уменьшался (отрицательная фотопроводимость) (рис. 1, а, кривая 1). При энергиях 1.4—1.6 эВ после первоначального уменьшения тока наблюдался обратный релаксационный процесс и только после выключения света наблюдалась положительная часть фотопроводимости, связанная с рекомбинационным процессом (кривые 2—6).

Такое поведение фототока можно понять, если представить, что результирующий сигнал формируется как сумма двух сигналов противоположной полярности с различными временами релаксации (рис. 1, б, штриховые кривые). Положительный сигнал можно приписать обычному процессу увеличения концентрации фотоносителей при  $E > 1.4$  эВ в валентной зоне и зоне проводимости. Появление отрицательного сигнала может быть связано с несколькими причинами, например с появлением фотоэда [5]. В этом случае, однако, при перемене полярности внешнего поля эти два сигнала должны складываться и менять результирующий фотоотклик. В данных экспериментах форма сигнала не зависит от полярности. Сложная форма сигнала фотоотклика может быть также следствием существования в образце некоторых специфических центров захвата и центров рекомбинации [6], но такие процессы сопровождаются, как правило, большими временами релаксации после выключения света.

В данном случае появление отрицательного сигнала фотоотклика связано, по-видимому, с тем, что освещение неровных поверхностей скола способствует образованию градиентов концентраций, которые приводят обычно к появлению фотодиффузионного тока. В случае, когда коэффициент диффузии носителей  $n$ -типа мал, возможно пространственное разделение

зарядов, и возникающие внутренние электрические поля могут служить причиной уменьшения исходного темнового тока.

Используя эти рассуждения для анализа кривых на рис. 1, можно считать, что в парамагнитной фазе вблизи дна зоны проводимости находятся фактически локализованные со-

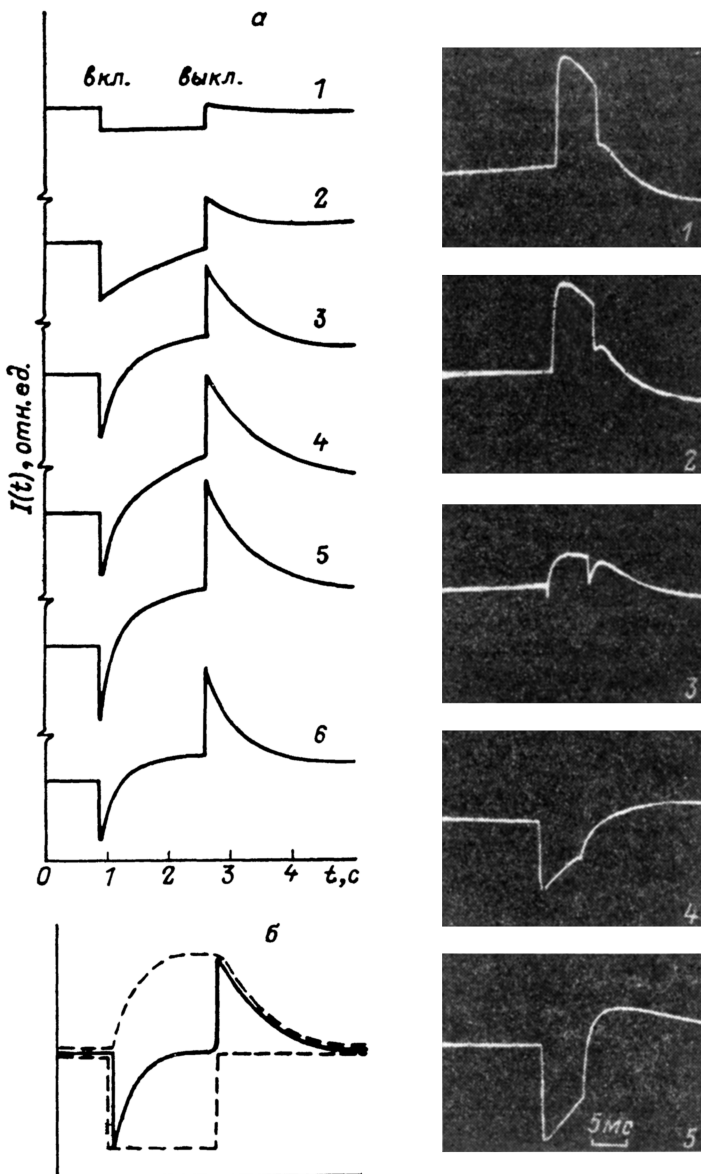


Рис. 1.

*a* — временная зависимость поведения фототока в парамагнитной фазе ( $T=200$  К) при различных энергиях освещения; 1 — 1.3, 2 — 1.35, 3 — 1.4, 4 — 1.45, 5 — 1.5, 6 — 1.6 эВ. *б* — разложение результирующего сигнала (сплошная линия) на два сигнала положительной и отрицательной полярности (штриховые кривые).

Рис. 2. Осциллограммы нестационарной части фотопроводимости в ферромагнитной области при  $T=100$  и  $120$  К (1, 2) и в парамагнитной области при  $T=150, 180, 200$  К (3—5).

стояния, приводящие лишь к отрицательной фотопроводимости, а при  $E \geq 1.4$  эВ существуют состояния зонного типа. При понижении температуры до 130 К при переходе в ферромагнитную фазу динамика фототока начинает существенно изменяться (рис. 2, кривые 1—5), и при  $T=90$  К фотопроводимость становится положительной. Этот факт говорит о преобладании зонных состояний вблизи края оптического поглощения в ферромагнитной области. Эти результаты качественно согласуются с теоретическими выводами многоэлектронной модели магнитного полупроводника  $CdCr_2Se_4$  [4].

- [1] Аут И., Генцов Д., Герман К. // Фотоэлектрические явления. М.: Мир, 1980. С. 31—33.  
 [2] Мощняга В. Г., Голант К. М., Веселаго В. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 9. Вып. 24. С. 1473—1476.  
 [3] Калинин В. Т., Аминов Т. Г., Голик Л. Л. и др. // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1978. Т. 14. № 8. С. 1408—1412.  
 [4] Гавричков В. А., Ерухимов Ш. М., Овчинников С. Г., Эдельман И. С. // ЖЭТФ. 1986 Т. 90. Вып. 4. С. 1275—1287.  
 [5] Као К., Хуанг В. // Перенос электронов в твердых телах. М.: Мир, 1984. Ч. 2. С. 190—191.  
 [6] Puvkin S. M. // J. Phys. Chem. Sol. 1961. Vol. 22. P. 5—17.

Институт физики им. Л. В. Киренского  
 СО АН СССР  
 Красноярск

Поступило в Редакцию  
 16 февраля 1988 г.  
 В окончательной редакции  
 6 июня 1988 г.

02; 05

Журнал технической физики, т. 59, в. 4, 1989

## СПЕКТРОСКОПИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ В ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ

С. Н. Кузнецов, В. А. Гуртов

Нитрид кремния является базовой запоминающей средой в современной микроэлектронике [1]. Это связано с рядом уникальных свойств  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , обусловленных энергетической структурой запрещенной зоны диэлектрика. Термоактивационные методы исследования выявляют лишь грубые черты спектра состояний запрещенной зоны (например, [1]). Отсутствие подробной информации о локализованных состояниях отчасти объясняет имеющийся в литературе широкий спектр представлений о природе глубоких центров в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [2]. Изучение фотопроводимости под краем собственного поглощения позволяет принципиально получить детальную картину спектра состояний  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Следует отметить работу [3], в которой возникновение нестационарного фототока в слое нитрида кремния с односторонним блокирующим контактом объяснено фотоопустошением ловушек в запрещенной зоне. Однако результаты [3] имеют ограниченную доказательность, так как допускают более непринужденную фотоинжекционную трактовку. В настоящей работе проведены первые измерения стационарной фотопроводимости, в том числе индуцированной, для слоев нитрида кремния под краем собственного поглощения.

Измерения проводились в структуре  $\text{Si}-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Me}$  с полупрозрачными металлическими электродами при комнатной температуре. Знак и величина напряжения смещения обеспечивают сильное обогащение основными носителями поверхности кремния, при этом вклад фотоотклика области пространственного заряда полупроводника устраняется. Использовалось двойное фотозвуждение. Тестовая засветка в интервале энергии квантов света  $h\nu = 1-5$  эВ выполнялась модулированным (частота  $\sim 5$  Гц, скважность 2) потоком, формируемым дуговой ксеноновой лампой мощностью 1 кВт и решеточным монохроматором МДР-2. Энергетическая ширина выходной щели не превосходила 0.05 эВ в указанном диапазоне  $h\nu$ . Дополнительная подсветка в полосе собственного поглощения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  проводилась фокусированным потоком от дейтериевой лампы ДДС-30 через интерференционный светофильтр с полосой пропускания  $h\nu \approx 5.4 \pm 0.3$  эВ. Регистрация стационарных фототоков в структурах осуществлялась по двум отдельным каналам. В цепь образца включался преобразователь тока, в напряжение типа У5-9, регистрировавший постоянную составляющую тока (темнового и подсветки). Одновременно преобразователь осуществлял согласование сопротивлений цепи образца и входа селективного гомодинного нановольтметра «Унипан-232В», измерявшего модулированную компоненту фототока. Опорный сигнал для нановольтметра формировался от модулятора стандартным способом. Схема обеспечивала разделение каналов не менее чем в  $10^6$  раз и реальную чувствительность по току модулированного канала  $10^{-14}$  А (при постоянной времени синхродетектирования 100 с).