

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЗОЛОТОМ

А. С. Закиров, Х. Т. Игамбердыев, А. Т. Мамадалимов, П. К. Хабибуллаев

Отдел теплофизики Академии наук Узбекистана, 700135, Ташкент, Узбекистан
(Получена 15 августа 1991 г. Принята к печати 28 апреля 1993 г.)

Исследована температурная зависимость фотопроводимости кремния *n*- и *p*-типа, легированного золотом при 77—300 К. Обнаружено изменение спектральной зависимости фотопроводимости от температуры. Показано, что эти изменения могут быть объяснены в рамках перестройки энергетических уровней золота в кремнии в результате термостимулированных процессов. Предложены возможные физические модели наблюдаемых явлений.

Наблюдаемые особенности температурных зависимостей теплофизических свойств кремния, легированного примесями с глубокими энергетическими уровнями, находят объяснение в модели перестройки примесных центров в результате изменения их зарядового состояния [¹⁻³]. Такие центры с переориентирующимися электрическими и упругими дипольными моментами способны релаксировать, вследствие чего центр может туннелировать между различными положениями равновесия в решетке [⁴]. Поэтому в таких системах релаксационные процессы должны проявляться не только в температурных зависимостях теплофизических свойств, но и в других, в частности, электрических и фотоэлектрических свойствах.

Целью данной работы являлось исследование температурной зависимости фотопроводимости в системе кремний—золото, где ранее были обнаружены аномалии теплофизических свойств.

1. Методика и экспериментальные результаты

В экспериментах использовались образцы кремния *n*- и *p*-типа с исходным удельным сопротивлением 35—40 Ом·см при 300 К. Легирование золотом проводилось путем высокотемпературной диффузии (1200 °С) с последующим охлаждением на воздухе. Спектральная зависимость фотопроводимости (ФП) исследовалась модулированным светом и при различных фиксированных температурах начиная с $T=77$ К. После каждого прохода спектра и перехода на другую температуру производилось восстановление исходного состояния образца путем снятия электрического поля и света, а также изменением нагрузочного сопротивления. Удельное сопротивление обоих типов образцов после диффузии возрастало до значений $4 \cdot 10^4$ и $1.5 \cdot 10^3$ Ом·см соответственно при 300 К. С помощью спектральных зависимостей при 77 К было установлено, что в кремнии *n*-типа, легированном золотом, ФП начинается при $h\nu = 0.54$ эВ, а в кремнии *p*-типа — при $h\nu = 0.34$ эВ. В целом оба спектра были монотонными, и начало примесной ФП золота хорошо согласуется с известными литературными данными [⁵].

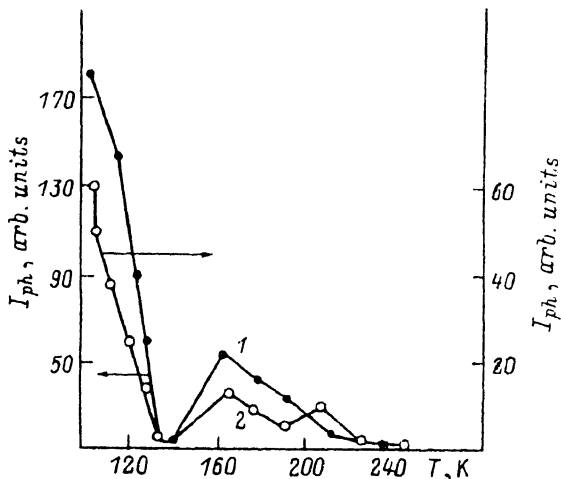


Рис. 1. Температурная зависимость фототока для кремния *n*-типа, легированного золотом при $h\nu$, эВ: 1 — 0.86, 2 — 0.63.

На рис. 1 показана зависимость фототока *n*-Si <Au> от температуры для фиксированного значения $h\nu = 0.86$ эВ (кривая 1) и $h\nu = 0.63$ эВ (кривая 2). Выбор этих значений $h\nu$ обусловлен тем, что в первом случае примесным светом зондируются оба уровня золота одновременно, а во втором ($h\nu = 0.63$ эВ) только верхний акцепторный уровень. Как видно из рис. 1, для этой зависимости характерны три области изменения фототока от температуры. До температуры $T = 143$ К фототок быстро спадает, т. е. наблюдается уменьшение фоточувствительности образца. Далее, до температуры $T = 165$ К мы наблюдаем рост фототока, а в третьей области наблюдается экспоненциальный его спад. При достижении температуры 220 К фоточувствительность образцов в примесной области спектра полностью исчезает, и фототок фактически становится равным нулю. В зависимости фототока при $h\nu = 0.63$ эВ наблюдается такой же характер изменения I_{ph} , за исключением области 193—220 К, где наблюдается небольшой всплеск фототока и его полное исчезновение.

На рис. 2 представлена такая же зависимость при $h\nu = 0.86$ эВ для образцов *p*-Si <Au>. Из сопоставления этих зависимостей для *n*- и *p*-кремния видно, что начиная с температур больше 160 К зависимости фототока существенно различаются, т. е. если в образцах *p*-Si <Au> мы видим увеличение фоточувствительности в примесной области спектра и соответственно фототока, то в образцах *n*-Si <Au> наблюдается его уменьшение. Кроме того, в спектральной зависимости ФП в кремнии *p*-типа, легированном золотом, было обнаружено смещение красной границы фотопроводимости в более коротковолновую область спектра, зависящее от температуры. На рис. 3 представлены эти зависимости для состояния образца *p*-Si <Au>, соответствующего различным температурам: 77 К (кривая 1), 145 К (кривая 2) и 215 К (кривая 3). Как видно, при $T = 77$ К начало ФП лежит при $h\nu = 0.34$ эВ, что соответствует энергии ионизации нижнего уровня золота с $E_1 = E_v + 0.34$ эВ. С ростом температуры в спектральной области 0.34 эВ $\leq h\nu \leq 0.6$ эВ амплитуда ФП уменьшалась, при этом одновременно наблюдался рост фототока в области $0.6 \leq h\nu \leq 0.9$ эВ (кривая 2). Такое изменение амплитуды ФП происходило до температуры $T = 163$ К, после чего ФП в области $h\nu = 0.34$ эВ исчезает и начало фотопроводимости смещается в область $h\nu = 0.63$ эВ. В *n*-Si <Au> такого эффекта смещения нет, однако начиная с $T = 220$ К фотопроводимость в примесной области спектра полностью отсутствует. Соотношение амплитуд ФП в области $0.34 \leq h\nu \leq 0.6$ эВ и $0.6 \leq h\nu \leq 0.9$ эВ зависело от

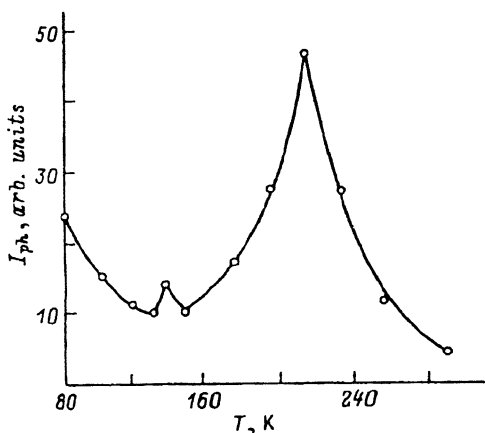


Рис. 2. Температурная зависимость фототока для кремния *p*-типа, легированного золотом при $h\nu = 0.86$ эВ.

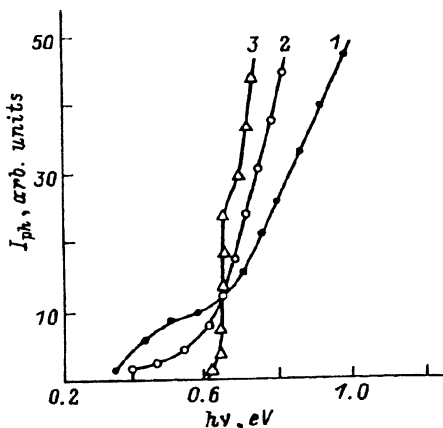


Рис. 3. Спектры фотопроводимости кремния *p*-типа, легированного золотом при различных температурах. T , К: 1 — 77, 2 — 145, 3 — 215.

скорости нагревания образца, т. е. в случае быстрого нагрева изменения спектра или его смещения в другую область мы не обнаружили. Если построить отдельные кривые зависимости изменения амплитуд ФП (для указанных областей) от скорости повышения температуры, то эти кривые не совпадают, а при одинаковой температуре наблюдается гистерезис. Наличие гистерезиса однозначно указывает на существование некоторого времени $\tau_{об}$, которое определяет наблюдаемое изменение амплитуд ФП и смещение начала ФП. В зависимости от $\tau_{д} > t$ или $\tau_{д} < t$ (t — длительность нагрева) смещение границы ФП либо проявляется, либо нет.

Последнее позволяет предположить, что энергии активации уровней $E_1 = E_v + 0.34$ эВ и $E_2 = E_c - 0.54$ эВ соответствуют не двум различным атомам золота, а одному — в двух различных состояниях взаимодействия в решетке кремния. Из чего следует, что при определенных условиях происходит трансформация энергетического спектра, которая обусловлена перестройкой центра E_1 в состояние E_2 [6]. При этом данный процесс сопровождается увеличением концентрации последнего. Действительно, до такой перестройки в экспериментах наблюдаются оба уровня с E_1 и E_2 . С увеличением температуры уровень с E_1 трансформируется и переходит в состояние E_2 , тем самым уменьшая долю фотопроводимости, характеризующее E_1 -состояние. В то же время концентрация E_2 -состояния растет, чем обусловлен рост фототока в области $0.6 \leq h\nu \leq 0.9$ эВ и при $T > 160$ К регистрируется ФП, соответствующая только уровню с E_2 . Следует отметить, что данный процесс обратим, т. е. при понижении температуры до 77 К E_1 -состояние восстанавливается и спектр фотопроводимости принимает прежний вид. Вместе с тем амплитуды ФП в вышеуказанных областях также восстанавливаются до прежнего уровня.

2. Обсуждение результатов

Вначале рассмотрим зависимость I_{ph} от температуры при фиксированном значении $h\nu$ (рис. 1) с точки зрения перестройки центра $E_1 \rightarrow E_2$. В начальный момент (при $T = 77$ К) значение фототока в *n*-Si <Au> определяется фотоэмиссией электронов с уровня E_2 в зону проводимости. С увеличением температуры происходит включение процесса термоионизации, что, естественно, приводит к падению фоточувствительности (см. рис. 1, кривая 1). Но при этом переход состояния $E_1 \rightarrow E_2$ ограничивается барьером E_T (энергия активации перестройки).

Далее, с ростом T термоактивированная вероятность преодоления барьера E_T возрастает и E_1 переходит в состояние E_2 . Возможно, именно этот переход определяет возрастание фоточувствительности во второй области до тех пор пока все электроны под воздействием температуры не перейдут в полностью ионизованное состояние. При этом фоточувствительность практически становится равной нулю.

Вместе с тем известно [7], что фоточувствительность кристаллов кремния, легированного примесями с глубокими уровнями, помимо прочих условий зависит от степени заполнения глубокого уровня. Поэтому при анализе результатов спектра ФП, по-видимому, необходимо принимать во внимание и процессы термоэмиссии электронов на уровень E_1 , поскольку при этом меняется степень заполнения данного уровня и, соответственно, фоточувствительность в этой области спектра. Рассмотрим этот случай конкретно для кремния p -типа, легированного золотом.

В исходном, равновесном состоянии при $T = 77$ К либо оба уровня с E_1 и E_2 могут быть пустыми, либо уровень E_1 находится в частично заполненном состоянии. Пустыми оба уровня золота будут при точной компенсации, т. е. когда концентрации уровней Au (N_{Au}) и мелких равны. В этом случае кристаллы имеют максимальную фоточувствительность. Однако в реальных условиях этого достичь сложно, поскольку обычно бывает $N_{Au} > N_s$ и уровень E_1 находится в частично заполненном состоянии. В этих условиях ФП в примесной области спектра будет определяться уровнями E_1 и E_2 , а ее начало соответствовать E_1 . По мере заполнения уровня E_1 электронами фоточувствительность в данной области спектра падает. Такой эффект наблюдается при одновременном освещении образцов собственным светом, поскольку уровень E_1 является уровнем прилипания для электронов и он будет захватывать электроны из зоны проводимости [5]. Уменьшение фоточувствительности в зависимости от температуры также обусловлено заполнением уровня E_1 , но только не за счет захвата электронов из зоны проводимости, а за счет термоэмиссии электронов из валентной зоны. Именно за счет термоэмиссии в определенной области температур уровень E_1 полностью заполнится и ФП в примесной области спектра будет определяться уровнем E_2 . В результате в спектре наблюдается смещение начала ФП (рис. 3, кривая 3). Из чего ясно, что уменьшение фоточувствительности или же смещение края ФП обусловлены частичным или полным заполнением центра за счет термоэмиссии. Однако на самом деле мы наблюдаем не только смещение красной границы ФП, но и увеличение фотоответа в области $0.6 \leq h\nu \leq 0.9$ эВ (рис. 2). Эти факты однозначно свидетельствуют о том, что увеличение фотоответа в указанной области спектра не может произойти без увеличения концентрации центров уровня E_2 , которое происходит за счет трансформации центра E_1 вследствие перестройки $E_1 \rightarrow E_2$. Подтверждением этого служат данные по температурной зависимости теплоемкости, где ранее нами обнаружены аномалии примерно в тех же областях температуры. Вместе с тем вследствие перестройки $E_1 \rightarrow E_2$ может меняться не только концентрация центра E_2 , но и одновременно сечение захвата или фотоионизации данного центра, что, вероятно, может привести к изменениям фоточувствительности.

Таким образом, модель перестройки и трансформации центра E_1 объясняет наблюдаемое зависимое от температуры изменение энергетического спектра фотопроводимости в кремнии, легированном золотом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Х. Т. Игамбердыев, А. Т. Мамадалимов, П. К. Хабибуллаев. Теплофизика кремния, 136. Ташкент (1990).
- [2] Д. А. Вахабов, А. С. Закиров, Х. Т. Игамбердыев, А. Т. Мамадалимов, П. К. Хабибуллаев. ФТТ, 30, 1979 (1988).

- [3] Д. А. Вахабов, А. С. Закиров, Х. Т. Игамбердыев, А. Т. Мамадалимов, П. К. Хабибуллаев. ИФЖ, 55, 459 (1988).
- [4] Н. Т. Баграев, А. А. Лебедев, В. А. Машков, И. С. Половцев. ФТТ, 30, 2076 (1988).
- [5] Л. М. Капитонова, А. А. Лебедев, А. Т. Мамадалимов, Ш. Махкамов. ФТП, 8, 468 (1974).
- [6] Л. В. Кучинский, В. М. Ломако, Л. Н. Шахлевич. Письма ЖЭТФ, 43, 423 (1986).
- [7] А. А. Лебедев, А. Т. Мамадалимов. ФТП, 9, 1609 (1975).

Редактор В. В. Чалдышев
