

РЕЛАКСАЦИЯ ПРИМЕСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ПРИМЕСЯМИ III И V ГРУПП

Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова

Исследована кинетика примесного фотоответа кремния, легированного примесями Ga, Bi, B, In и As при постоянном и СВЧ (37 ГГц) напряжении смещения. Обнаружено, что при СВЧ смещении проявляется медленная релаксация (10^{-5} с) примесей B, As и In, обусловленная большим временем жизни их глубоких возбужденных состояний.

Каскадный захват носителя заряда на притягивающий центр в полупроводнике¹ можно рассматривать как процесс энергетической диффузии по квазинепрерывным возбужденным уровням центра до тех пор, пока носитель не достигнет уровней с энергией ионизации, существенно большей тепловой энергии kT (см. обзор²). Величины и температурные зависимости сечений захвата электронов и дырок на доноры V и акцепторы III групп в кремнии, рассчитанные на основе каскадной теории, согласуются с экспериментальными данными². Однако релаксация возбуждения заканчивается лишь после локализации носителя в основном состоянии примеси в результате переходов между глубокими и основными состояниями с выделением энергии, во много раз превышающей kT . Такие переходы, вообще говоря, возможны в результате многофононных или излучательных процессов, вероятность которых невелика. Нижний предел времени жизни глубоких возбужденных состояний можно оценить по ширине линий примесного поглощения³, который оказывается порядка 10^{-10} с. Мы обнаружили, что для ряда примесей время релаксации возбуждения на много порядков превышает эту величину.

Исследовался фотоответ кремниевых образцов размером $10 \times 3,5 \times 1$ мм, легированных в концентрациях $10^{16} - 10^{17}$ см⁻³ при СВЧ (37 ГГц) и постоянном (≤ 10 В) напряжении смещения. Концентрация компенсирующих примесей в исходных образцах составляла $10^{12} - 10^{13}$ см⁻³. Для достижения более сильной компенсации ряд образцов, легированных B и Ga, дополнительно легировался фосфором в процессе нейтронного облучения и последующего отжига. Контакты для измерений на постоянном смещении создавались на образцах ионной имплантацией. Образцы возбуждались излучением лазеров (10,6 или 3,39 мкм), модулированном с частотой $10^2 - 10^7$ Гц. Исследовалась зависимость фотоответа от температуры (5–50 K) и частоты модуляции f . По зависимости фотоответа от f можно было определять времена релаксации до 10^{-8} с, а по запаздыванию фазы – до 10^{-9} с. Описание метода эксперимента приведено в⁴.

На рис. 1, 2 приведены температурные зависимости фотоответа ряда образцов кремния, легированного Ga, Bi, B, In и As. Из рис. 1 видно, что для примесей Ga и Bi зависимости фотоответа при СВЧ и постоянном смещении совпадают и не зависят от f . Эти зависимости типичны для подобных образцов кремния². Совершенно иная ситуация в случае кремния, легированного B, In, и As (рис. 2). При постоянном смещении температурная зависимость фотоответа не зависит от частоты модуляции вплоть до $f \leq (2\pi\tau)^{-1}$, где τ – время жизни фотоносителей, и аналогична приведенной на рис. 1. Такая же температурная зависимость ответа при СВЧ смещении наблюдается только при $f > 10^5$ Гц. При низких f СВЧ ответ совпадает с ответом на постоянном токе лишь в области высоких температур. При понижении температуры ответ резко возрастает. Различие СВЧ ответа при низкой температуре и высокой и низкой частоте тем больше, чем выше концентрация компенсирующей примеси. Так, при концентрации доноров $N_d = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ в кремнии, легированном B, это различие превышает два порядка. Времена релаксации фотоответа при СВЧ смещении можно определить по его частотной зависимости на рис. 3. В кремнии, легированном Ga, он не зависит от f вплоть до 10^6 Гц

и далее уменьшается благодаря конечному $\tau = 1,5 \cdot 10^{-8}$ с. В случае кремния с В и As падение ответа наблюдается уже при $f > 10^3$ Гц, а частотная зависимость соответствует времени релаксации порядка 10^{-5} с. При этом в слабо компенсированном кремнии, легированном В, также имеется высокочастотный участок падения ответа, соответствующий $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с.

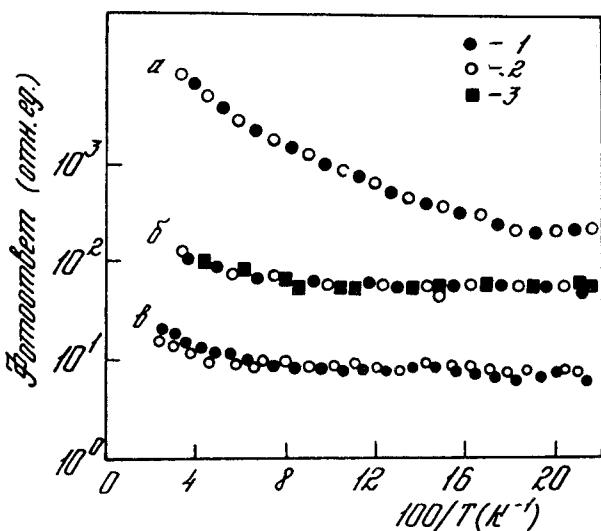


Рис. 1. Температурная зависимость фотоответа кремния, легированного:
а – Ga ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$); б – Ga ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$); в – Bi ($1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). СВЧ смещение: 1 – $f = 800$ Гц; 2 – $f = 0,5-1,3$ МГц; постоянное смещение: 3 – $f = 800$ Гц

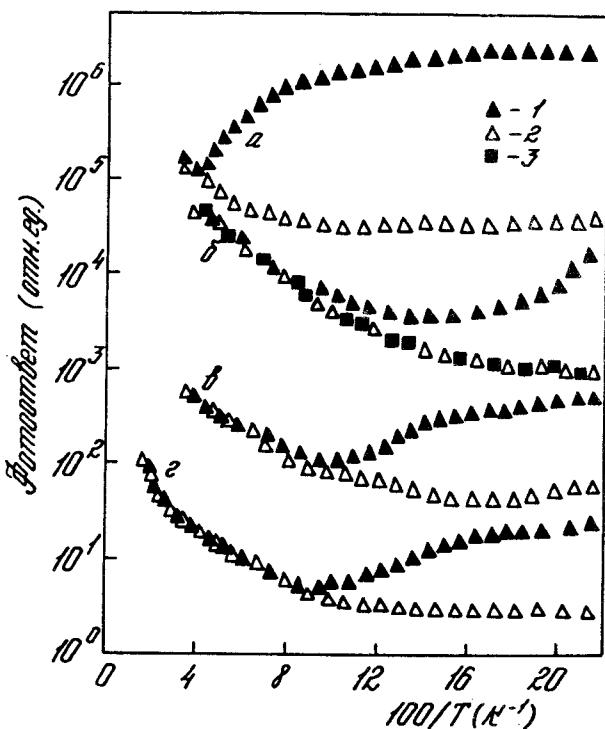


Рис. 2. Температурная зависимость фотоответа кремния, легированного:
а – В ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$); б – В ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$); в – As ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); г – In ($1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). СВЧ смещение: 1 – $f = 800$ Гц; 2 – $f = 0,5-1,3$ МГц; постоянное смещение: 3 – $f = 800$ Гц

Мы полагаем, что медленная релаксация СВЧ ответа связана с большим временем жизни $\tau_0 \approx 10^{-5}$ с глубоких возбужденных состояний примесных атомов В, In и As. Это подтверждается отсутствием медленной релаксации в случае Ga и Bi, связанного со спецификой структуры их энергетического спектра. Действительно, известно³, что второе возбужденное состояние Ga в кремниевом резонансно оптическому фону и его быстрая релаксация приводят к катастрофическому уширению соответствующей линии в спектре поглощения. Аналогичная ситуация имеет место и для примеси Bi, у которого $2P_0$ -состояние также резонансно оптическо-

му фонону в направлении (110). Такая резонансная однофононная релаксация невозможна как в случае В и As (поскольку их энергии ионизации меньше энергий оптических фононов), так и в случае In (энергия его первого возбужденного состояния много больше энергии оптических фононов).

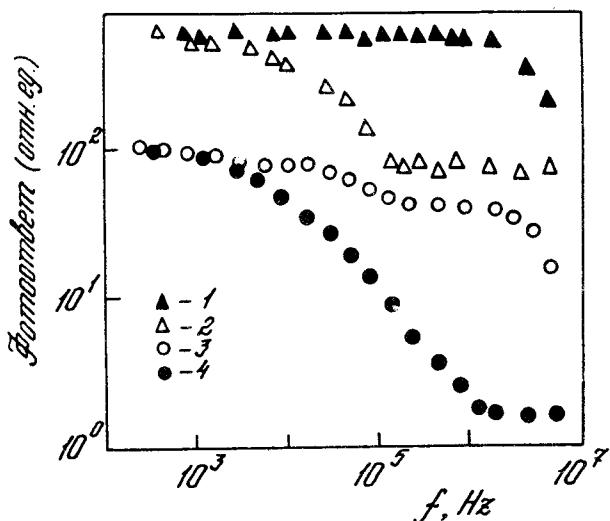


Рис. 3. Частотная зависимость фотоответа при СВЧ смещении и 5 К кремния, легированного: 1 – Ga ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$); 2 – As ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); 3 – В ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$); 4 – В ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

Из рис. 1–3 следует, что при $f > 10^5$ Гц СВЧ ответ определяется временем жизни фотоносителей τ . Концентрация же возбужденных состояний примесей при низких температурах не зависит от τ и должна определяться временем жизни возбужденных состояний $\tau_0 \approx 10^{-5}$ с и скоростью возбуждения $G : N^* = G\tau_0$. Увеличение различия СВЧ ответа при низкой и высокой f с уменьшением τ (возрастанием компенсации) также согласуется с заключением, что СВЧ ответ при низких температурах определяется N^* . Повышение температуры должно вызывать опустошение возбужденных состояний вследствие их термической ионизации и возрастания вероятности многофононной релаксации, в соответствии с рис. 2.

Изменение N^* при фотовозбуждении должно вызывать увеличение диэлектрической проницаемости образца благодаря возрастанию поляризуемости примесных атомов χ в возбужденном состоянии. Поэтому модуляция СВЧ излучения может возникать за счет модуляции диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon = 4\pi\chi N^*$. Для грубой оценки можно положить $\chi = r^3$, где $r \approx 10^{-6}$ см – радиус возбужденного состояния. При $G = 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ $N^* \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $\chi \approx 10^{-4}$. Другим возможным механизмом возникновения СВЧ ответа представляется прыжковая проводимость по возбужденным состояниям примесей, наблюдавшаяся в алмазе⁵. Такая фотопроводимость при СВЧ смещении может на много порядков превышать проводимость на постоянном токе, аналогично прыжковой проводимости по основным состояниям кремния⁶.

Следует подчеркнуть, что при любом механизме взаимодействия возбужденных примесных атомов с СВЧ излучением время жизни возбужденных состояний не может быть меньше времени релаксации СВЧ ответа $\sim 10^{-5}$ с, определенному экспериментально.

Литература

1. Lax M. Phys. Rev., 1960, **119**, 1502.
2. Абакумов и др. ФТП, 1968, **12**, 3.
3. Ramdas A.K., Rodriguez S. Rep. Progr. Phys., 1981, **44**, 1297.
4. Алтухов И.В. и др. ФТП, 1990, **24**, в печати.
5. Смирнова О.И. и др. ФТП, 1986, **20**, 869; ФТП, 1987, **21**, 1278.
6. Pollak M., Geballe T.H. Phys. Rev., 1961, **122**, 1742.