

ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ЗОЛОТОМ, ОТ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ

Касьмова Р. С., Абдукаримова Х. Р.

Проведен теоретический анализ влияния заполнения центров золота в *n*-кремнии на стационарную фотопроводимость. Установлена сильная связь между временем жизни неравновесных носителей тока и степенью компенсации материала. Показано, что высокая фоточувствительность в случае слабой компенсации ($N_d \geq N_{Au}$) может быть погашена оптическим возбуждением или повышением температуры.

Ранее нами был проведен анализ влияния оптической перезарядки центров золота и тепловых забросов с этих центров на стационарную фотопроводимость кремния [1]. Было показано, что на разных участках возбуждения фоточувствительность кремния, легированного золотом, N_d^+ меняется в зависимости от степени заполнения центров примеси неравновесными электронами.

В настоящей работе приведены результаты расчета зависимости времени жизни фотовозбужденных носителей тока в кремнии, легированном золотом, от степени

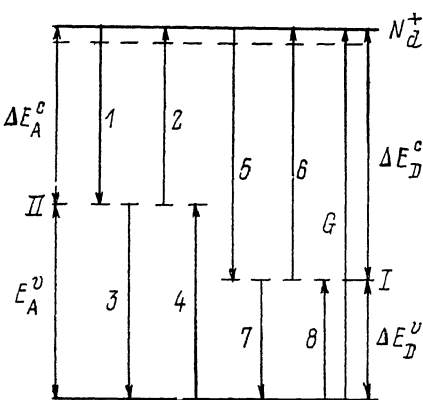


Рис. 1. Зонная диаграмма и схема возможных электронных переходов для *n*-кремния, легированного золотом.

$n_0 + \Delta n$, *c*-зона (*a*); $p_0 + \Delta p$, *v*-зона (*b*). 1 — $\gamma_{n_1} N_1 n$, 2 — $\gamma_{n_1} N_{c_2}$, 3 — $\gamma_{p_2} N_2 p$, 4 — $\gamma_{p_2} N_1 P_{v_2}$, 5 — $\gamma_{n_0} N_0 n$, 6 — $\gamma_{n_0} N_1 N_{c_1}$, 7 — $\gamma_{p_1} N_1 P$, 8 — $\gamma_{p_1} N_0 P_{v_1}$; остальные обозначения в тексте.

компенсации, выполненные по методике, предложенной в [1]. Расчет проведен на примере *n*-кремния. Диапазон изменения исходной концентрации мелких доноров $N_d = 10^{14} \div 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Концентрация центров золота $N_{Au} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Известно, что центры золота в кремнии могут находиться в трех зарядовых состояниях: -1 , 0 , $+1$, которым соответствуют два энергетических уровня: акцепторный, расположенный на $E_A^- = 0.54 \text{ эВ}$ от дна зоны проводимости, и донорный, расположенный на $E_D^+ = 0.35 \text{ эВ}$ от потолка валентной зоны [2]. В условиях термодинамического равновесия уровни золота заполняются равновесными электронами согласно условию компенсации, и соответственно в зонах существует некоторая концентрация свободных носителей n_0 , p_0 .

При освещении полупроводника светом происходит оптическая перезарядка уровней. На рис. 1 показана схема возможных электронных переходов с указанием их интенсивностей для однородно легированного золотом *n*-кремния при наличии генерации неравновесных носителей *G*. Здесь приняты следующие обозначения: N_0 , N_1 , N_2 — концентрации положительно заряженных, нейтральных и отрицательно заряженных центров золота соответственно. N_0^+

$+N_1+N_2=N_{Au}$ — полная концентрация центров золота; $n=n_0+\Delta n$ и $p=p_0+\Delta p$ — соответственно концентрация свободных электронов и дырок; γ_{ni} и γ_{pi} — коэффициенты захвата свободных носителей соответствующими центрами; N_{c1} , N_{c2} и P_{v1} , P_{v2} — приведенные плотности состояний соответственно в зоне проводимости и валентной зоне относительно нижнего (I) и верхнего (II) уровней. Направления стрелок указывают захват и тепловой заброс электронов на уровни и с них в соответствующие зоны.

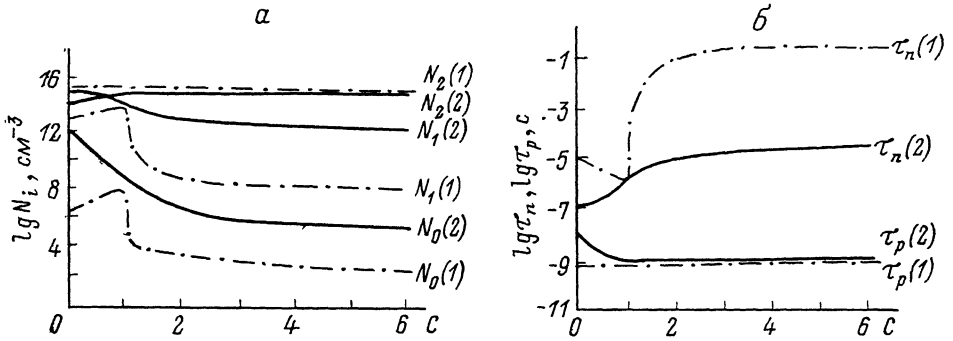


Рис. 2. Зависимости концентраций многозарядных центров золота (а) и времени жизни носителей тока (б) в n -кремнии от степени компенсации.

$C = N_d/N_{Au}$; $N_{Au} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 77 \text{ К}$, $G, \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$: штрихпунктирные кривые — 10^{16} , сплошные кривые — 10^{20} . Обозначения те же, что и на рис. 1.

На рис. 2 показаны полученные из расчета зависимости концентраций многозарядных центров золота и времени жизни носителей тока от степени компенсации при среднем ($G \approx 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) и высоком ($G \approx 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) уровнях возбуждения для низкой (77 К) температуры, а на рис. 3 — аналогичные зависимости для комнатной (300 К) температуры. На рисунках по оси абсцисс отложена величина C , равная отношению N_d/N_{Au} и характеризующая степень компенсации кремния.

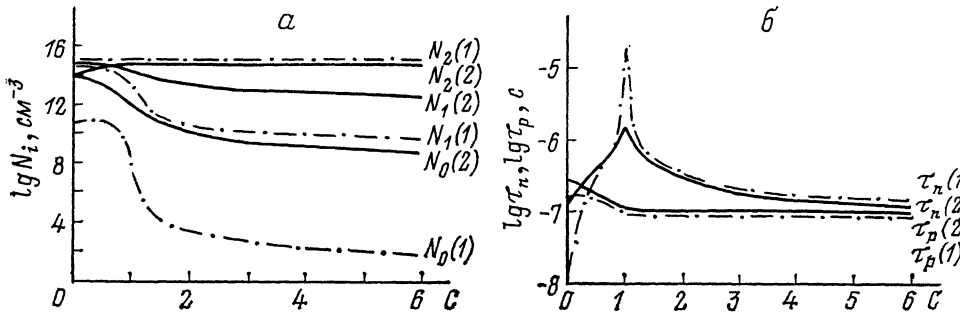


Рис. 3. Зависимости концентрации многозарядных центров золота (а) и времени жизни носителей тока (б) в n -кремнии от степени компенсации.

$T = 300 \text{ К}$; остальные обозначения и параметры те же, что и на рис. 1, 2.

В стационарном случае выражения для времени жизни электронов и дырок (с учетом приведенных на рис. 1 электронных переходов) могут быть записаны как [1]

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{G} = \frac{\Delta n}{U_2 + U_1} = \frac{\Delta n}{[\gamma_{n1}N_1n - \gamma_{n1}N_2N_{c2}] + [\gamma_{n0}N_0n - \gamma_{n0}N_1N_{c1}]}, \quad (1)$$

$$\tau_p = \frac{\Delta p}{G} = \frac{\Delta p}{V_2 + V_1} = \frac{\Delta p}{[\gamma_{p2}N_2p - \gamma_{p2}N_1P_{v2}] + [\gamma_{p1}N_1p - \gamma_{p1}N_0P_{v1}]}, \quad (2)$$

где U_1 , U_2 и V_1 , V_2 — скорости рекомбинации электронов и дырок соответственно через верхний и нижний уровни золота, которые зависят от температуры (интенсивностей тепловых забросов) и уровня возбуждения. Количественная оценка составляющих этих скоростей при различных условиях (температуры, уровня возбуждения, степени компенсации) позволяет определить роль I и II уровней в рекомбинации и прилипании носителей тока и выявить тем самым очувствляющие или гасящие свойства центров золота в кремнии.

В отличие от известной модели Роуза [3], объясняющей эффекты очувствления и гашения при наличии двух независимых каналов рекомбинации, в случае многозарядных примесных центров уровни взаимосвязаны, и в результате перезарядки одни и те же примесные центры могут выступать в качестве центров очувствления или гашения в зависимости от их зарядового состояния и концентрации. Рассмотрим влияние степени компенсации на концентрации центров золота в различном зарядовом состоянии и время жизни носителей тока.

Как видно из рис. 2, а и б, при низких температурах зависимость времени жизни электронов от степени компенсации кремния определяется ходом изменения N_1 . Однозначная зависимость τ_n от N_1 и количественные оценки скоростей рекомбинации через уровни золота указывают на то, что рекомбинация происходит в основном через верхний акцепторный уровень. В области слабой компенсации ($C > 1$) центры золота почти полностью заполнены электронами, что обеспечивает высокое постоянное время жизни для электронов и низкое — для дырок, отношение которых определяется уровнем возбуждения (при $G = 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ $\tau_n/\tau_p = 10^8$). По мере приближения к точной компенсации ($C = 1$) уменьшение концентрации равновесных свободных электронов и рост концентрации нейтральных центров N_1 приводят соответственно к падению времени жизни τ_n , это более наглядно проявляется при низком уровне возбуждения. При точной компенсации ($C = 1$, $N_{\text{Au}} = N_a$) время жизни электронов остается относительно большим. При перекомпенсации ($C < 1$) имеют место (в соответствии с изменением концентрации нейтральных центров золота) дальнейшее падение, а затем рост τ_p (1) (отметим, что при расчетах было принято: $N_{\text{Au}} = 10^{15} \text{ см}^{-3} = \text{const}$, а степень компенсации меняется путем изменения исходной концентрации мелких доноров). Время жизни для дырок τ_p (1) при этом не меняется.

Как видно из рис. 2, б и 3, б, в области слабой компенсации ($C > 1$) повышение температуры от 77 до 300 К вызывает сильное падение времени жизни электронов τ_n (1), т. е. можно наблюдать температурное гашение фотопроводимости. Анализ показал, что уменьшение времени жизни электронов с температурой обусловлено не столько изменением заполнения центров золота, сколько увеличением концентрации равновесных носителей в зонах и усилением рекомбинации носителей. В области перекомпенсации рост температуры (рис. 2 и 3) вызывает заметное опустошение центров золота, что приводит к проявлению в рекомбинации и нижнего донорного уровня. Этим объясняется более резкий спад τ_p (1).

Увеличение уровня фотовозбуждения также может привести к гашению фоточувствительности (рис. 2, б, кривые 1, 2), что обусловлено в отличие от случая температурного гашения оптической перезарядкой центров золота.

Таким образом, аналогичные расчеты и анализ зависимости времени жизни неравновесных носителей тока от степени компенсации могут быть использованы при подборе исходного материала и режима его легирования в зависимости от назначения прибора (высокочувствительный фоторезистор либо быстродействующий импульсный диод и др.) и режима его работы (температуры, уровня инжекции, освещения и т. п.).

Список литературы

- [1] Абдукаримова Х. Р., Касымова Р. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 2. С. 238—243.
 [2] Bullis W. M. // Sol. St. Electron. 1966. V. 9. N 2. P. 143.
 [3] Роуз А. Основы теории фотопроводимости. М. 1966. 192 с.