

В.П. ДОБРЕГО

МЕЖПРИМЕСНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В ПРЫЖКОВОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ. 2. РЕЛАКСАЦИИ РОСТА И СПАДА

The research of particularities of interimpurity recombination on the kinetics of the hopping photoconductivity, caused by light of own band of absorption [1], is continued. The angular factors of a function of photoconductivity instant lifetime from the time passed after light switching off are calculated. Results of the calculation agree with experimental dependencies, obtained on *n*-germanium, compensated by copper. The nonmonotonic growth of the hopping photoconductivity with excitation level decrease (observed in experiments) is explained.

В первой части работы [1] в приближении малой компенсации и низкого уровня возбуждения было получено универсальное уравнение кинетики прыжковой фотопроводимости (ПФП). Здесь на основании этого уравнения установлены и сопоставлены с экспериментальными кривые спада фотопроводимости, а также кривая роста в случае резкого изменения уровня возбуждения.

Мгновенное время жизни фотопроводимости

Зависимость мгновенного времени жизни от времени $\tau_{\text{мгн}}(t)$, определяемая путем анализа кривых спада фотопроводимости, служит важной характеристикой рекомбинационного процесса [2]. Поведение функции

$$\tau_{\text{мгн}}(t) = -\frac{\Delta\sigma}{d(\Delta\sigma)/dt}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – неравновесная компонента проводимости (фотопроводимость), характерно для различных видов рекомбинации.

На основании уравнения (12) из [1], устанавливающего связь относительной фотопроводимости $\Delta\sigma/\sigma_t = H(J, j, \alpha, T, \theta)$ с безразмерными параметрами, по спаду фотопроводимости определим выражение для мгновенного значения времени жизни ПФП:

$$\tau_{\text{мгн}}(\theta) = U(J, j, \alpha, T, \theta) = \frac{H(J, j, \alpha, T, \theta)}{-\left[\frac{d}{d\theta} H(J, j, \alpha, T, \theta)\right]}. \quad (2)$$

При расчете задавались параметры, отвечающие обычным условиям наблюдения ПФП. Интенсивность возбуждения J соответствовала стационарной фотопроводимости $\Delta\sigma = 0,1\sigma_t$, где σ_t – проводимость в темноте. Продолжительность интервала возбуждения T выбиралась такой, чтобы спад начинался от величины фотопроводимости, равной 99 % ее стационарного значения. Ход релаксации определялся при полном снятии возбуждения $j=0$. График функции $\tau_{\text{мгн}}(\theta)$, где θ – безразмерное время при всех реальных значениях параметра α ($\alpha = 2\rho/a$, ρ – среднее расстояние между примесями, a – радиус состояния мелкой примеси (см. формулу (6) в [1])), представляет собой возрастающую кривую, наклон которой уменьшался со временем.

Для определения углового коэффициента $A(\theta)$ использовалась либо разностная формула

$$A(\theta) = \frac{U(1,005 \cdot \theta) - U(0,995 \cdot \theta)}{0,01 \cdot \theta}, \quad (3)$$

либо непосредственное дифференцирование функции $U(\theta)$.

Расчетные значения углового коэффициента кривой $\tau_{\text{мгн}}(\theta)$ на разных уровнях релаксации $(\Delta\sigma(\theta)/\Delta\sigma_{\text{ст}})$ приведены в таблице.

Изменение углового коэффициента от уровня релаксации

α	Уровень релаксации								
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
20	—	4,85	3,86	3,70	3,13	2,94	2,61	—	—
14	5,91	3,78	2,98	2,51	2,26	2,07	1,92	1,78	1,6
7	4,37	2,70	2,05	1,67	1,40	1,22	1,07	0,92	0,80

Зависимость углового коэффициента от времени, прошедшего после снятия возбуждения, при $\alpha=14$ отражена на рис. 1.

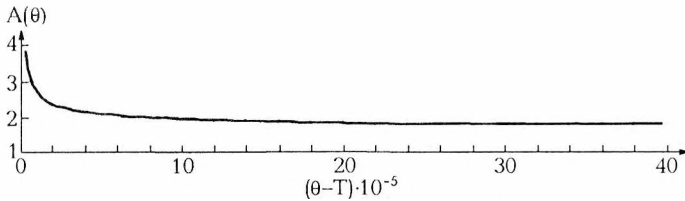


Рис. 1. Зависимость углового коэффициента от времени после выключения света

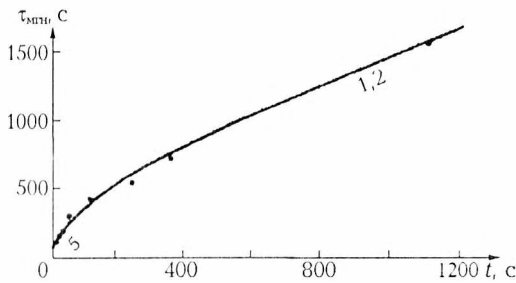


Рис. 2. Экспериментальная зависимость мгновенного времени жизни ПФП ($N_{\text{сп}}=4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; компенсация $K=0,15$; числа у кривой – угловые коэффициенты)

На рис. 2 дана экспериментальная зависимость мгновенного времени жизни фотопроводимости, полученная на образце германия, легированного сурьмой и компенсированного медью. Медь – глубокая примесь в германии, поэтому применение простой экспоненциальной зависимости для $\tau(r)$ (формула (7) в [1]) обосновано. Общий ход зависимости $\tau_{\text{мгн}}(t)$ соответствует полученному в

расчете, величины угловых коэффициентов также близки к расчетным.

Кинетика нарастания прыжковой фотопроводимости

При простых рекомбинационных схемах в отсутствие различного рода ловушечных центров кинетика фотопроводимости имеет монотонный характер. Экспериментальное исследование кинетики нарастания прыжковой фотопроводимости при ступенчато меняющемся во времени возбуждении показало, что фотопроводимость изменяется немонотонно (рис. 3). При включении света с интенсивностью I_1 в момент времени t_1 начинается рост фотопроводимости в соответствии с кривой I до стационарной величины фотопроводимости P_1 . Если в момент t_2 , когда фотопроводимость достигла величины P_0 , снизить возбуждение до уровня I_2 , соответствующего стационарной фотопроводимости P_2 , рост до этого уровня происходит немонотонно.

В случае, например, линейной рекомбинации кривая роста концентрации носителей (и фотопроводимости) при ненулевых начальных условиях описывается уравнением

$$\Delta n = \Delta n_{\text{ст}} - (\Delta n_{\text{ст}} - \Delta n_i) \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

где $\Delta n_{\text{ст}}$ – стационарная концентрация неравновесных носителей, Δn_1 – концентрация неравновесных носителей в начальный момент времени.

Из уравнения (4) следует, что, если временной интервал начался при ненулевой концентрации неравновесных носителей (момент t_2 на рис. 3), то изменение концентрации от Δn_1 до $\Delta n_{\text{ст}}$ происходит монотонно по экспоненциальному закону. Монотонной кривой отражается релаксация и при квадратичной рекомбинации.

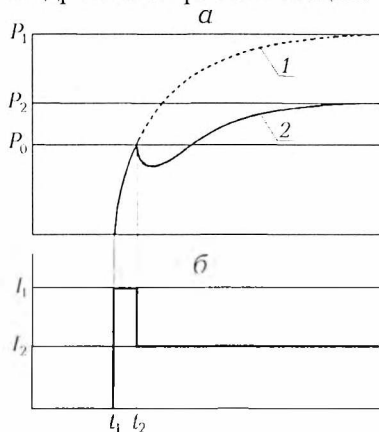


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной зависимости фотопроводимости от времени при ступенчатом изменении возбуждения (a – фотопроводимость; b – интенсивность возбуждающего света)

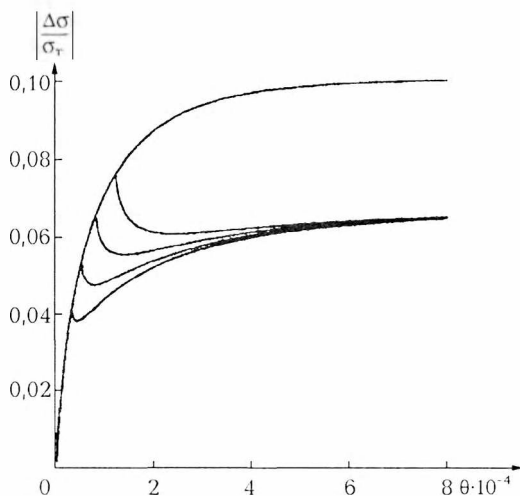


Рис. 4. Расчетная кинетика относительной фотопроводимости при резком уменьшении возбуждения

Кинетика ПФП при ненулевых начальных условиях может быть изучена с помощью функции $H(J, j, \alpha, T, \theta)$ (уравнение (12) [1]), которая описывает изменения концентрации неравновесных носителей (и проводимости) на втором этапе возбуждения образца при различной продолжительности и интенсивности возбуждения на первом этапе.

На рис. 4 приведен расчетный график изменения фотопроводимости в случае, когда в некоторый момент ее роста уровень возбуждения резко уменьшается. В примере $j/J=0,5$, $\alpha=7$, остальные параметры аналогичны иллюстрирующим уравнение (2). На всех приведенных кривых релаксации наблюдается минимум проводимости.

Как показывает анализ, во всех случаях резкого уменьшения проводимости на кривых существует минимум, хотя скачок возбуждения в начале или в конце кривой роста приводит к менее выраженному минимуму.

Такое поведение релаксационной кривой является следствием многоканального характера межпримесной рекомбинации (МПР). Согласно модели МПР, разделяющей акцепторы на группы в зависимости от расстояния между акцептором и ближайшим к нему донором, акцепторы захватывают генерируемые светом дырки независимо от заполнения ими акцепторов других групп. Рекомбинационный поток созданных светом неравновесных дырок в цепи переходов v -зона – акцептор – ближайший донор – c -зона на этапе межпримесной рекомбинации распределяется по множеству параллельных, независимых друг от друга каналов, обладающих различными характеристиками. При резком снижении темпа генерации на стадии роста фотопро-

водимости быстрые каналы, уже пришедшие в генерационно-рекомбинационное равновесие, окажутся в нестационарном состоянии. Рекомбинация через быстрые каналы начнет преобладать над генерацией, и общее число неравновесных носителей уменьшится. Позже общий рост концентрации неравновесных носителей будет преобладать за счет их накопления у медленных каналов, темп рекомбинации через которые останется меньше равновесной величины и при снизившейся генерации.

1. Доброго В.П. Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 2003. № 2. С. 25.

2. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963.

Поступила в редакцию 23.12.2002.

Виктор Петрович Доброго – кандидат физико-математических наук, доцент.

УДК 621.315.592

В.В. ЖАВНЕРЧИК, В.М. БОРЗДОВ, В.О. ГАЛЕНЧИК

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОДЛОЖКИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ИНВЕРСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В Si-МОП-СТРУКТУРЕ

The self-consistent solution of the Scrodinger and Poisson equations was carried out, which allowed to investigate the behavior of the function of electron concentration versus the coordinate in the direction of quantization in Si-inversion layers with substrate's orientations (100) and (111).

В связи с широким использованием в микро- и нанoeлектронике кремниевых МОП-структур важное научное и практическое значение приобретает исследование эффектов локализации электронов у границы раздела окисел – полупроводник, в частности в инверсионном слое. Известно, что толщина этого слоя в кремниевой подложке p -типа сравнима с длиной волны де Бройля для «среднего» электрона, и, следовательно, электронный газ в инверсионном слое является квазидвумерной системой [1]. В этой связи особый интерес представляет изучение изменения концентрации квазидвумерных электронов в направлении, перпендикулярном границе раздела окисел – полупроводник, и влияния на нее ориентации подложки [2].

В настоящей работе представлены результаты самосогласованного расчета концентрации инверсных электронов $N(z)$ в направлении оси Z , в котором происходит квантование их энергии, и сравнительного анализа зависимости $N(z)$ от ориентации подложки в плоскостях (100) и (111).

Значения энергетических уровней различаются в зависимости от ориентации подложки, что связано с анизотропией эффективной массы электронов. Для подложки с ориентацией (100) электроны будут иметь эффективные массы m_z в направлении оси Z , равные $0,916 m_0$ и $0,190 m_0$, а при ориентации (111) – $m_z=0,258 m_0$ в интервале температур $100 \div 400$ К, где m_0 – масса покоя электрона [1, 3]. В первом случае в потенциальной яме инверсионного слоя существуют две системы энергетических уровней, которые принято обозначать $E_0, E_1, E_2, \dots$ и $E_0', E_1', E_2' \dots$.

Поверхностная концентрация электронов на i -м энергетическом уровне может быть рассчитана по формуле [1]

$$N_i = g_i \frac{m_i kT}{\pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_i}{kT} \right) \right],$$