проведенное в [4], будет дано впоследствии. Особо подчеркнем, что использованный метод восстановления удерживающего потенциала по уровням энергии и нормировочным постоянным можно применять не только для эквидистантных, но и для «произвольно» расположенных уровней $E_n \rightarrow \infty$ $(n \rightarrow \infty)$. Эта задача рассмотрена нами в отдельной публикации [11].

Авторы глубоко признательны П. В. Елютину и Н. П. Клепикову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Quigg C., Rosner I. L. Phys. Rev., 1981, D23, р. 2625; Moxhay P., Rosner I. L., Quigg C. Phys. Rev., 1981, D23, р. 2638. [2] Адамян М. Н. Теор. и матем. физика, 1981, 48, с. 70. [3] Ньютон Р. Теория рассеяния воли и частиц. М.: Мир, 1968, гл. 20. [4] Аbгаhат Р. Р., Моses Н. Е. Phys. Rev., 1980, A22, р. 1333. [5] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974, с. 158. [6] Мошинский М. Гармонический осциллятор в современной физике. М.: Мир, 1972, с. 11—12. [7] Шадан К., Сабатье П. Обратные задачи в квантовой теории рассеяния. М.: Мир, 1980, с. 66—69. [8] Кривченков В. Д., Кукин В. Д. ДАН СССР, 1972, 204, с. 60. [9] Аlessandrini V. А., Giambiagi I. I. Nuovo Cim., 1963, 39, р. 1353. [10] Ахиезер Н. И., Глазман И. М. Теория линейных операторов в гильбертовом пространстве. М.: Наука, 1966, с. 521— 526. [11] Гостев В. Б., Минеев В. С., Френкин А. Р. ДАН СССР, 1982, 262, с. 1364.

Поступила в редакцию 25.06.81

ВЕСТН. МОСК, УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 2

УДК 539.293:535.215

О ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕРЕЗАРЯДКАХ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ И ЭФФЕКТАХ НЕУПОРЯДОЧЕННОСТИ В GaAs, ДЕГИРОВАННОМ ХРОМОМ

В. В. Остробородова, Л. Г. Радовильская

(кафедра физики полупроводников)

Высокоомные кристаллы n-GaAs(Cr) должны обладать высокой фоточувствительностью (ФЧ) к излучениям ближней ИК и видимой области $hv > \delta_g(T)$. Параметром, характеризующим чувствительность таких кристаллов, по существу, является произведение μτ≕µղπ_{մո}= $=\mu_n(\tau_n+\tau_p/b)$ подвижности электронов на обобщенное время жизни неравновесных носителей заряда, в котором вклад электронов усиливается высоким $b \equiv \mu_n / \mu_p \simeq 20$. Для практически важной проблемы высокотемпературного детектирования существенны параметры µт при комнатной температуре, когда они и в меньшей степени подвержены действиям интегральных и спектральных I(hv) подсветок [1, 2]. Мы провели исследования поведения µ и т в условиях освещения разных групп кристаллов с темновыми отношениями концентраций электронов и дырок $n_{\rm T}/p_{\rm T} = C_{\rm T}$ в пределах от 10⁻³ до 10² и pn-, пр-биполярными и n-монополярными темновыми холловскими подвижностями µ*. Максимальными μτ ≥ 10⁻³ см²/В обладали образцы «*n*-группы» при интенсивностях основного освещения в максимуме ФЧ (hv_м≈1,43 эВ) I_м> $>10^{14}$ см⁻² с⁻¹, а также образцы *пр*-группы при достаточно сильной собственной подсветке; образцы рп-группы во всех условиях освещения обладали более чем на порядок меньшей фоточувствительностью. Однако в случае образцов *пр*- и *n*-групп при меньших I_м мы встретились с невоспроизводимостью фотоответа i*_м=i_м/I_м~µт при фиксированных «темновых» или созданных подсветкой стационарных $\rho^* \gg$

>10⁷ Ом.см. Особенно велик был разброс (в пределах $i^*_{\rm M}$ —0,1 $i^*_{\rm M}$) в 41-группе с $C_{\rm T}$ >10; в темновых характеристиках этих образцов при T < 350 К проявлялись устойчивые отклонения $\rho_{\rm T}$ и $\mu^*_{\rm T}$ от значений на основной экспоненте 0,8 эВ в сторону занижения. В то же время воздействие стационарных спектральных I(hv) подсветок на модулированный ($\omega = 70$ —400 Гц) фотоответ не было значительным, и отношения $\eta \equiv i_{\rm MI}/i_{\rm MO}$ в разных областях спектра не превышали 0,5—2. При этом, однако, в отличие от устойчивых эффектов примесного гашения (ПГ), слабого у *pn*- и более сильного у *пр*-образцов, и собственной стимуляции (СС) у *пр*-образцов, эффекты подсветок в *n*-группе также не были устойчивыми, меняясь от преимущественно Г- до преимущественню С-типа (рис. 1). Обращал на себя внимание и тот факт, что «соб-



Рис. 1. Типичные спектры подсветки n- (1, 2), np- (3) и pn-образпов (4) при $I(h\nu)/I_{\rm M} \ge 5$, $I_{\rm M} \cong$ $\cong 2-4\cdot 10^{13}$ см⁻² с⁻¹; точки — эффективные холловские подвижности, соответствующие спектрам I, 2. Заштрихована область $h\nu_{\rm M}$



Рис. 2. Зависимости μ^*_n (сплошные кривые) и η (пунктирные) от интенсивности I(hv) стационарной подсветки: I(n), 2(np), $3(pn) - Bhv_{M}$; 4(n) - Bhv = = 1 эВ (произвольные исходные состояния; $5, 6(n) - Bhv_{M}$ (соответственно в состояниях I, 2 рис. 1); 7(n) - Bhv = 1,3 эВ; 8(n) - 1 эВ

ственные» Г- и С-пики *п*-образцов, в отличие от *пр*-образцов, четко располагаются в области $h_{V} \simeq 1.35$ эВ< \mathcal{E}_{g} .

Качественное различие эффектов подсветок в разных группах образцов свидетельствует о том, что они не могут быть объяснены простым «частотным» эффектом, т. е. понижением сопротивления ρ_{cr} и повышением отношения нагрузки $r_{\rm H}$ к r_{cr} (\ll 1). Для выяснения причин наблюдаемых различий мы исследовали спектры холловских подвижностей $\mu^*(h_V)$ и $\mu^*(I_M)$, $\mu^*(I)$, характер зависимости фотомагнитных токов от магнитного поля $i_{\rm ФМ}(B)$ в $h_{\rm V_M}$. Кроме того, исследована кинетика изменения $\rho^*_{\rm T}$, $\mu^*_{\rm T}$ после засветки лампой накаливания (ЛН), имеющей максимум излучения в области ПГ наших образцов и, таким образом, могущей быть источником неконтролируемых засветок образцов в процессе подготовки к измерениям.

Как видно из рис. 1, спектр (1) $\mu^*(hv)$ в *n*-образцах (четко коррелирующий со спектром (1) подсветки в области 1,35 эВ), свидетельствует об эффективной генерации дырок центрами a-h, проявляющимися в термостимулированной проводимости высокоомного GaAs [1, 2]; снижение μ^* в других участках ПГ также свидетельствует о преимущественной *p*-генерации. Тем более непонятными кажутся наблюдаемые в тех же образцах *C*-кривые (2), которым всегда соответствуют сглаженные спектры $\mu^*(hv)$.

На рис. 2 представлены зависимости μ^*_n от I_M в образцах разных. групп при произвольных исходных состояниях, обычно включавших более низкие и более высокие исходные о^{*}т и µ^{*}_T. Видно, что рост µ^{*}_n характерен для всех групп кристаллов. Однако из зависимостей $i_{\phi M}(B)$ однозначно следует [3, 4], что в *пр*-образцах µ*_n при достаточно больших $I_{\rm M}$ становится практически *n*-монополярной, а в *pn*-группе фотопроводимость остается преимущественно р-типа (C<0,01). Именно этим обусловлено отсутствие собственной стимуляции в pn-группе (см. рис. 1). Очевидно, что рост μ^*_n в *n*-группе по своей природе иной, чем в биполярных образцах, поскольку µ^{*}_{nт} монополярна, но, как видно, равна или даже более низка, чем биполярная в *пр*-группе. Обращает на себя внимание характер изменения η с ростом $I(h_{v})$ ПГ-подсветок (см. рис. 2): сначала рост и лишь затем спад; соответственно μ^* также сначала слабо растет и лишь затем уменьшается. Подсветка в $hv_{\rm M}$ или только увеличивает, или только уменьшает η в состояниях 1 или 2, свидетельствуя о том, что сама по себе она не меняет существенно со-



Рис. 3. Типичные изменения ρ (\bigoplus , \bigcirc) и μ_n^* (- \bigoplus -, \bigcirc -) в образцах соответственью *пр*- и *п*-типа, со свежетравленой поверхностью в процессах различных воздействий. «О» — исходные, сразу после установки в темновой термостат; *1* после вакуумирования; *2* — после Выдержки в течсние суток в невосстанавливаемом вакууме; *3*, *4* — в момент и сразу после освещения ЛН; *4*—5 установление в темноте; *6*, *7* — после двух прогревов до 450 К; далее — повторение *3*—5. Точки у правой шкалы — темновые $\mu_{n_T}^*$ при 500 К стояния образца по n/p и заполнению основных рекомбинационных центров электронами.

На рис. З показаны результаты различных воздействий на при п-образцы; из него же становится по-настоящему ясным «произвольных исходных смысл состояний» кристаллов. Свежетравленые образцы всегда имеют о*т, µ*т, обусловленные низкие проводимостью; поверхностной вакуумирование при комнатной температуре резко повышает обе величины в *n*-образцах; однако, как видно из данных по *пр-*образцу, надежно исключить поверхностную проводимость удается лишь вакуумным прогревом до 450—500 К. И только после этого видны эффекты подсветки ЛН в объемных параметрах образцов. В *пр*-образцах μ^*_n снижается практически до нуля, а восстановление $\mu^*_{n_{\rm T}}$, $\rho_{\rm T}$ после выключения ЛН длится не менее суток. Величины $\rho_{T}(t)$ свидетельствуют об участии в перезарядке ΠO^{1} крайней мере двух уровней Ĉ €_{ic} ≅ €_g/2. Таким образом, участие «кислородного» Д-уровня [5, 6] в компенсации А-уровня хрома очевидно. Темп релаксации от, μ^*_{τ} показывает, что «темновые»-

и фоновые состояния *пр*-образцов могут быть различными по заполнению Д- и А-уровней электронами, а следовательно, и $i^*_{\rm M}$ могут быть разными, в зависимости от предыстории.

В п-образцах эффекты подсветки ЛН оказались иными: меньший

спад μ^*_n , а после выключения — более быстрое достижение максимума. Наиболее специфичным является последующий временной спад от и $\mu^*_{n_{\rm T}}$, который теперь никак не может быть связан с поверхностной проводимостью. Сами максимальные $\mu^*_{n\tau}(t)$ существенно ниже, чем при освещении в $hv_{\rm M}$ и hv = 0,7 эВ (см. рис. 1), и ниже темновой в npобразце. Мы полагаем, что причиной этих особенностей *п*-образцов может быть только равновесная компенсационная неупорядоченность, т.е. неоднородность, обусловленная сильным (включая полное) заполнением А- и Д-уровней электронами. По расчетам, проводимость областей с $N_{A}^{-}=N_{A}$, $N_{\Pi}^{0}=N_{\Pi}$ (имеющая энергию активации $\mathcal{E}_{ic}/2$), если они составляют более 0,1 объема образца, может быть значительно выше, чем областей с частичным (хотя бы и сильным) заполнением. ПГ-освещение с максимумом в области 1 эВ, генерируя дырки, уменьшает неоднородность и увеличивает эффективную подвижность носителей об этом свидетельствует наличие максимума в $\mu^*{}_{n_{T}}(t)$. Как показали специальные исследования, именно после длительного пребывания в темноте *n*-образцы обладают наинизшими *i**_м и эффектами подсветок C-типа. Спад i*_м(t) при выдержке образцов в темноте наблюдался нами в течение недели; при этом повысить $i^*_{M}(t)$ до начального можно было подсветкой Ім большей интенсивности. Таким образом, С-эффекты в п-образцах в значительной степени связаны с наличием в них равновесной неупорядоченности, которая уменьшается подсветкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

543

[1] Lin A. L., Bube R. H. J. Appl. Phys., 1976, 47, р. 1859. [2] Lin A. L., Отеlianovski E., Bube R. H. J. Appl. Phys., 1976, 47, р. 1869. [3] Остробородова В. В., Рябова Л. И., Симакин М. В. Физ. и техн. полупроводников, 1975, 9, с. 795. [4] Остробородова В. В., Аль-Кувейти М. С. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1979, 20, № 2, с. 3. [5] Морозова В. А., Остробородова В. В. Физ. и техн. полупроводников, 1981, 15, с. 1628. [6] Нивег А. М., Lin N. T. et al. J. Appl. Phys., 1979, 50 (6), р. 4022.

Поступила в редакцию 14.09.81