

О ВРЕМЕНАХ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ТЕЛЛУРЕ ПРИ НИЗКОМ УРОВНЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ю.В. Косичкин, Ю.И. Мазур^{*}), Ю.А. Поляков

УДК 621.315.592

Представлены данные о температурных и концентрационных зависимостях времен жизни неравновесных носителей тока в теллуре в условиях линейной рекомбинации, полученные с помощью исследования фотопроводимости теллура.

Изучение фотоэлектрических свойств полупроводников в условиях низкого уровня оптического возбуждения (один из предельных случаев для которого хорошо развита теория) позволяет получать полезную информацию о свойствах неравновесных носителей тока и, в первую очередь, о механизмах их рекомбинации.

В настоящем сообщении приведены предварительные результаты экспериментального исследования фотопроводимости (ФП) теллура в интервале температур $300 \div 20$ К при низком уровне возбуждения в условиях линейного режима процессов рекомбинации. Для успешного проведения экспериментов необходимо было учесть следующие обстоятельства:

а) процессы рекомбинации неравновесных носителей тока в теллуре в области низких температур характеризуются нелинейными свойствами /1-3/. При этом нелинейность начинает играть заметную роль уже при концентрациях неравновесных носителей в 100 раз меньших, чем концентрация равновесных /3/;

б) вследствие малой ширины запрещенной зоны теллура ($E_g \approx 330$ мэВ) при низком уровне возбуждения следует ожидать значительного влияния на характер релаксационных процессов ФП внешнего фонового излучения (излучение черного тела при комнатной температуре).

Действительно, как несложно рассчитать, интенсивность излучения черного тела при $T = 300$ К в спектральной области $h\omega > E_g$ составляет $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см⁻²с⁻¹ (при апертуре окон криостата $\sim 0,07\pi$ ср). Учитывая, что, например, при $T = 50$ К, согласно /2/, время жизни дырок $\tau_p \sim 2 \cdot 10^{-3}$ с, а

^{*}) Институт полупроводников АН УССР, Киев.

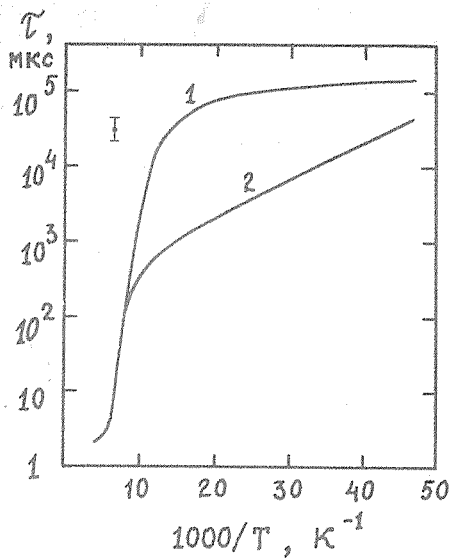
электронов $\tau_p \sim 10^{-8}$ с [4], стационарная концентрация неравновесных носителей, возникающая в образце из-за фонового излучения, порядка $3 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Для "чистых" образцов (с концентрацией равновесных дырок $p_0 \sim 10^{14}$ см $^{-3}$) — это всего в 3 раза меньше p_0 . При стационарной "подсветке" такой интенсивности и нелинейных свойствах рекомбинационных процессов измерение времен релаксации ФП, как показано в [5], не позволяет получать адекватную информацию о временах жизни неравновесных носителей.

Избежать указанных трудностей нам удалось, применив следующую схему эксперимента. Неравновесные носители возбуждались излучением полупроводникового инжекционного лазера на основе GaAs, работающего в импульсном режиме с длительностью импульса $\sim 10^{-6}$ с и частотой повторения $0,2 - 4 \cdot 10^3$ Гц. Лазер крепился на специальном держателе в непосредственной близости перед образцом ($2 \div 5$ мм). Токоподводы для питания лазера и съема сигнала ФП с исследуемого образца теллура монтировались таким образом, чтобы исключить возможные электрические наводки на сигнал с образца. Держатель с лазером и образцом помещался в криостат с непрерывным потоком гелия с двойным холодным экраном. Для того, чтобы в процессе охлаждения можно было регулировкой тока через лазер поддерживать постоянную мощность при изменении температуры, предварительно в оптическом криостате снимались температурные зависимости порогового тока и мощности излучения лазера при разных уровнях накачки.

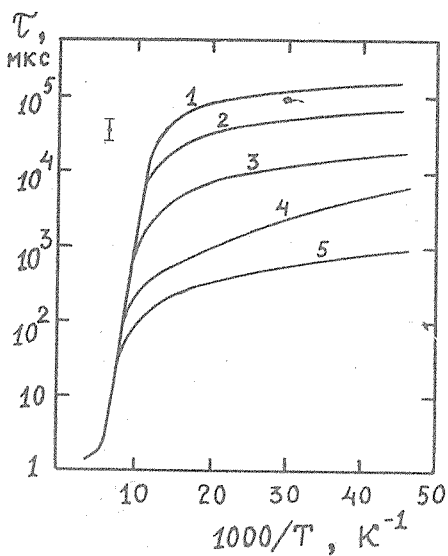
При изучении ФП использовался режим постоянного тока. Сигнал ФП с потенциальных контактов на образце усиливался широкополосным усилителем и регистрировался на самописце с помощью стробоскопического интегратора. Удавалось уверенно регистрировать относительное изменение проводимости порядка 10^{-5} .

Времена жизни неравновесных носителей тока τ определялись на "хвостах" релаксационных кривых сигнала ФП, где дифференциальное время жизни $\tau_{\text{диф}} = - \Delta\sigma / (d\Delta\sigma/dt)$ становилось константой, т.е. процесс рекомбинации неравновесных носителей происходил в линейном режиме.

На рис. 1 приведены зависимости времен жизни неравновесных носителей τ в теллуре от обратной температуры при низком уровне возбуждения ($I \sim 10^{12}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$) в случае отсутствия фонового излучения (кривая 1) и при измерениях по обычной методике [6] (кривая 2). При сравнении кривых зависимостей τ , измеренных с внешним фоновым излучением и без него, обращает на себя внимание значительное различие как в температурном поведении, так и в абсолютных значениях. В диапазоне $70 - 20$ К значения τ , измеренные разными способами при одной и той же температуре, различают-



Р и с. 1. Зависимость времени жизни неравновесных носителей тока в теллуре (примесная концентрация $p_0 = 1,8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$) от обратной температуры без (кривая 1) и при наличии (кривая 2) внешнего фонового излучения



Р и с. 2. Зависимость времени жизни неравновесных дырок от обратной температуры при отсутствии внешнего фонового излучения для образцов с различной примесной концентрацией p_0 : 1 - $2,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 - $3,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 - $6,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 4 - $8,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 5 - $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

ся более чем на два порядка. Кроме того, температурные зависимости времен жизни совпадают лишь при 150 — 100 К. При более низких температурах время жизни τ , определяемое без фонового излучения, растет с уменьшением температуры существенно медленнее, чем при наличии фонового излучения.

Измерение времен жизни в условиях, когда фоновое излучение отсутствует, позволило обнаружить сильную зависимость τ от равновесной примесной концентрации дырок p_0 (рис. 2). Так, при $T < 70$ К τ для образцов с различной примесной концентрацией изменяется $\propto 1/p_0^2$. В диапазоне $100 > T > 70$ К эта зависимость близка к $1/p_0$, а при $T > 100$ К τ практически не зависит от p_0 . При $T < 70$ К $\tau \propto 1/p_0^2$. Это свидетельствует о том, что в теллуре в этом диапазоне температур происходит процесс оже-рекомбинации, т.е. процесс столкновения трех частиц, две из которых рекомбинируют, а третья уносит выделяющуюся при этом энергию. В рассматриваемом линейном случае (рекомбинационный член в уравнении непрерывности имеет вид $\Delta p r_0^2$) сталкиваются две равновесные дырки (поскольку $\Delta p \ll p_0$) и электрон в зоне проводимости или захваченный на какое-либо разрешенное состояние внутри запрещенной зоны. Электрон с дыркой рекомбинируют, а выделившуюся при этом энергию уносит вторая дырка.

Следует подчеркнуть, что обычно оже-рекомбинация заметной роли при низких температурах не играет, поскольку в силу закона сохранения энергии и импульса в ней должны участвовать носители с волновым вектором, значительно отличающимся от нуля, что в параболической зоне означает, что эти носители должны иметь энергию, значительно превышающую их среднюю тепловую энергию, а число таких носителей при низких температурах пренебрежимо мало. В теллуре носители, располагающиеся у потолка валентной зоны, уже имеют волновой вектор, равный $2,15 \cdot 10^6$ см⁻¹, поэтому оже-процессы для конкретной зонной структуры теллура с учетом возможности перехода между разными зонами (а также и ловушками) могут играть заметную роль даже при очень низких температурах.

В заключение авторы выражают благодарность А.П. Шотову за ряд полезных советов и замечаний.

Поступила в редакцию 16 июля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.B. Anzin et al., Phys. Stat. Sol. (a), 20, № 1, 253 (1973).
2. P. Grosse, K. Winses, Phys. Stat. Sol., 13, № 1, 269 (1966).

3. В.Б. Анзин, Ю.В. Косичкин, А.И. Надеждинский. ЖЭТФ, 71, вып. 11, 1968 (1976).
4. T. Sakurai, M. Ishigame, Phys. Rev., 135, № 10, A1619 (1966).
5. С.М. Рывкин. Фотозлектрические явления в полупроводниках. М., ИФМЛ, 1963 г.
6. В.Б. Анзин и др., ФТТ, 21, вып. 2, 377 (1979).