

О ШИРИНЕ ЛИНИЙ ПРИМЕСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В АБСОРБЦИОННЫХ И ФОТОТЕРМОИОНИЗАЦИОННЫХ СПЕКТРАХ

Андреев Б. А., Козлов Е. Б., Лифшиц Т. М.

Проведено сравнение ширин линий в спектрах примесного оптического поглощения (ОП) с ширинами линий в спектрах фототермической ионизации (ФТИ) примесей в германии и кремнии. Оказалось, что ширины линий в ФТИ спектрах шире, чем в спектрах ОП. Это различие связано с различной длиной поглощения излучения при измерении ОП и ФТИ спектров.

Ширина линий в спектрах примесного оптического поглощения (ОП) в полупроводниках и механизмы, определяющие ее, исследовались теоретически и экспериментально во многих работах (см. обзоры [1-3]). Обычно полученные здесь результаты переносятся на спектры фототермической ионизации (ФТИ), тем самым предполагается, что форма линий поглощения определяет таковую и в спектрах линейчатой фотопроводимости. Однако в ряде работ [2] получены спектры оптически тонких образцов ($ad < 1$, a — коэффициент поглощения, d — толщина кристалла), в которых форма линий поглощения не зависит от концентрации поглощающей примеси, а линии в ФТИ спектрах значительно шире, чем в спектрах ОП. На рис. 1 приведены спектры ОП (1) и ФТИ (2) для образца германия, содержащего $1.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ акцепторов (из них 80 % Al и 20 % В) и $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ доноров (степень компенсации основной примеси $k = N_D/N_A = 0.25$, $d = 1.75 \text{ мм}$). Полная ширина линий бора и алюминия на высоте $\Delta\nu$, измеренная в см^{-1} , в спектрах ОП и ФТИ составляет соответственно для линий: В (D) — 0.10 и 0.13, В (C) — 0.10 и 0.17, Al (D) — 0.09 и 0.23, Al (C) — 0.09 и 0.23. Аналогичная картина наблюдается и в кремнии. На рис. 2 показаны спектры ОП и ФТИ образца Si : P с концентрацией фосфора $1.7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($k = 0.03$, $d = 2 \text{ мм}$). Здесь по сравнению с ОП в ФТИ спектре линия перехода $1s-2p_{\pm}$ уширена в ≈ 4 раза, $1s-3p_{\pm}$ — в ≈ 2 раза, а ширина линии $1s-3p_0$ в обоих спектрах одинакова. Ширина ФТИ линий систематически уменьшается с уменьшением концентрации примеси при одновременном увеличении амплитуды линий по отношению к сигналу в континууме фотоионизации. Этот эффект наблюдается до очень малых концентраций (в германии до $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, в кремнии до $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Только при таких и меньших концентрациях нейтральной примеси ширины линий в ФТИ спектрах становятся равными таковым в спектрах ОП. Сказанное показано на рис. 3, на котором приведена зависимость обратной ширины C-линии акцепторов (Al и Ga) в ФТИ спектрах германия от концентрации нейтральной примеси. В этих измерениях концентрация нейтральной примеси определена из холловских измерений, а концентрация акцепторов каждого сорта в случае, когда в образце их несколько, — из отношения площадей линий (см. [1]). Изменение амплитуд линий относительно континуума фотоионизации наблюдалось в [4].

На возможную причину различия формы линий в спектрах ОП и ФТИ указали Кальфа и Коган [5] и Кальфа [6]. По [6] такое различие может быть связано с неоднородным распределением примеси в частично компенсированном полупроводнике. Эффект обусловлен неодинаковой зависимостью фотопроводимости и поглощения от степени компенсации k основной примеси и проявля-

ется при больших k ($k > 0.5$). Этот механизм уширения ФТИ линий не может быть ответственным за описанные различия $\Delta\nu$ в ОП и ФТИ спектрах и зависимость этой величины от $N_{\text{осн}}$. При $k \leq 0.3$ (спектры рис. 1, 2) различия в форме линий ОП и ФТИ из-за неоднородности распределения примеси не возникает [6]. Кроме того, согласно [6], это различие не должно зависеть от $N_{\text{осн}}$, в то время как в нашем случае такая зависимость (рис. 3) является основным признаком наблюдаемого эффекта.

Исследуя причины отмеченных различий в форме линий в ОП и ФТИ спектрах, мы обратили внимание на то, что эти различия отсутствуют или малы не только в случае предельно чистых образцов, но также и для тех линий в образцах с не очень малой концентрацией, в которых коэффициент оптического погло-

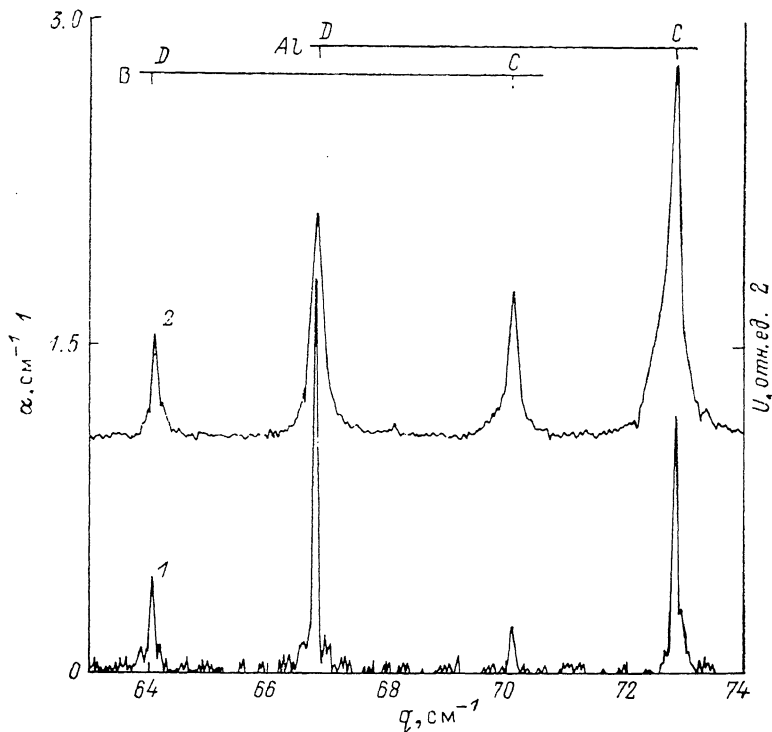


Рис. 1. Спектры оптического поглощения (1) и фототермической ионизации (2) образца высокочистого германия, содержащего примеси Al и В.

Толщина образца $d=1.75$ мм. Суммарная концентрация акцепторов $N_{\text{осн}}=1.6 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. Концентрация компенсирующей примеси $N_{\text{B}}=4 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$, $N_{\text{Al}}: N_{\text{B}} \cong 4:1$. Облучение образца светом из фундаментальной полосы поглощения исключено применением фильтров. U — фотопроводимость, q — волновое число.

щения мал. Картина такова, как если бы в ФТИ спектрах мы имели дело с обычным уширением, обусловленным насыщением поглощения в вершинах линий. Но в этом случае линии в ОП спектрах должны уширяться точно так же, как и в спектрах фотопроводимости, чего, как было показано, не наблюдается. Осталось предположить, что эффективная длина поглощения излучения при измерении ОП и ФТИ спектров разная, несмотря на то что оба спектра измеряются на одних и тех же образцах. Это позволило бы объяснить как концентрационную зависимость ширины линий в ФТИ спектрах, так и тот факт, что она возрастает с увеличением коэффициента поглощения в линиях. Различие в эффективной оптической толщине образцов при измерении двух видов спектров может быть связано с неизбежно возникающим рассеянием света в образце (рис. 4, а). В ФТИ спектре проявляется все поглощение, в том числе и то, которое происходит при распространении излучения по наклонным лучам, захватываемым участки образца за пределами диафрагм, ограничивающих пучок. При этом для части излучения может иметь место и полное внутреннее отражение. Длина таких лучей в образце может значительно превышать толщину

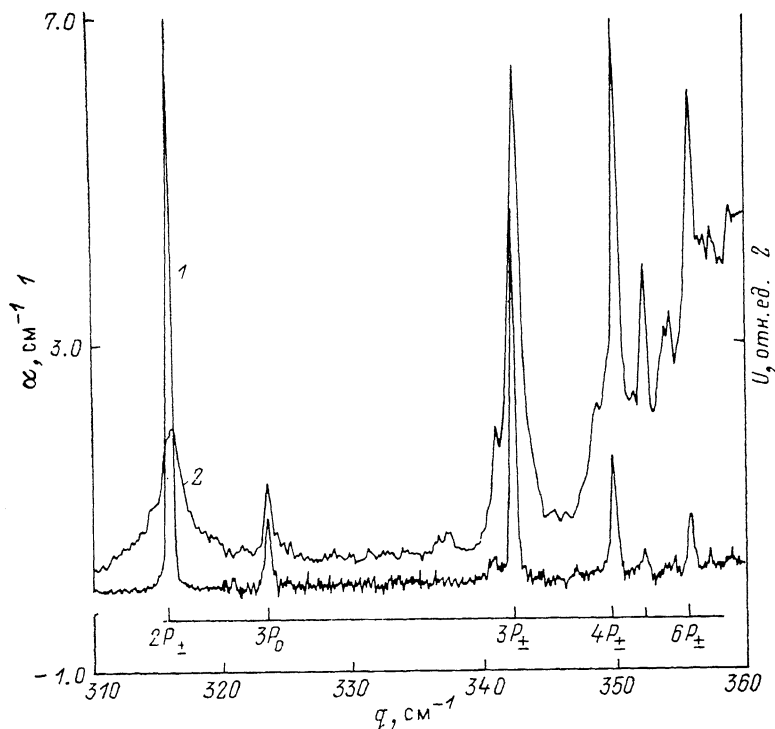


Рис. 2. Спектры оптического поглощения (1) и фототермической ионизации (2) образца кремния, легированного фосфором в концентрации $N = 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Концентрация компенсирующей примеси $N_k = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Линия $2p_{\pm}$ спектра ОП приведена в уменьшенном в 2.5 раза масштабе.

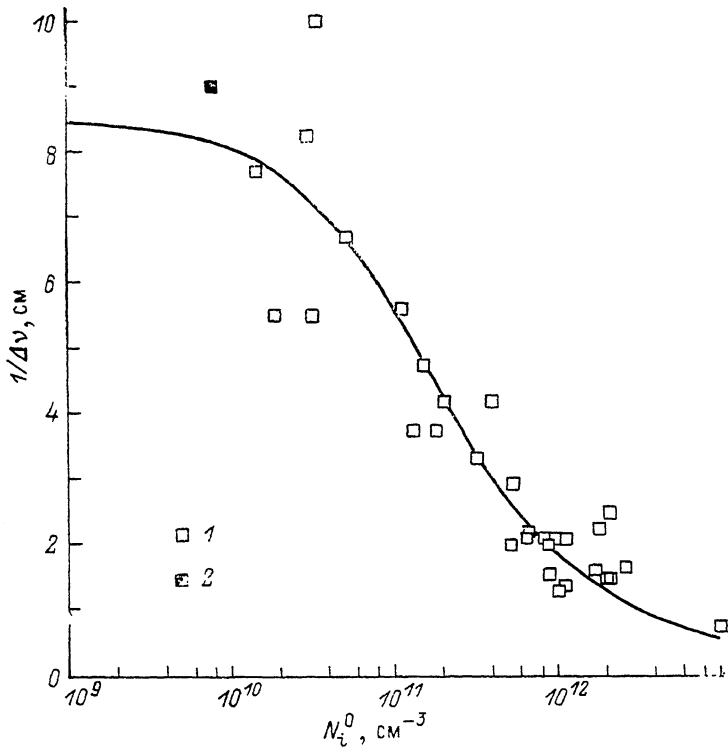


Рис. 3. Зависимость обратной ширины линий ($1/\Delta\nu$, см) в ФТИ спектрах от концентрации нейтральных примесей в p-Ge.

1 — Al, 2 — Ga. Сплошная кривая — результат усреднения экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

образца. В то же время коэффициент поглощения определяется из измерений пропускания, в которых пучок излучения ограничен входной и выходной диафрагмами либо апертурой приемника. В этом случае эффективная оптическая

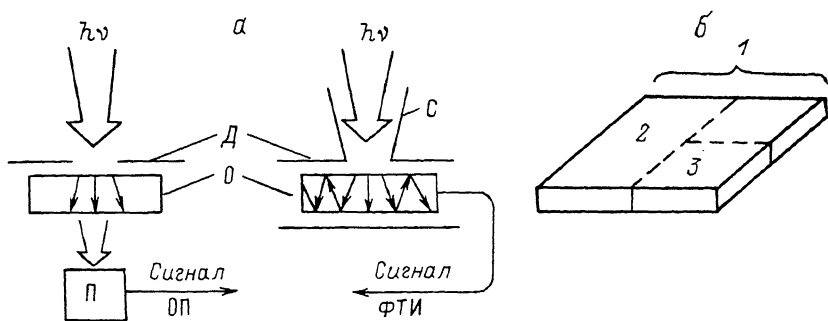


Рис. 4.

a — расположение образца (*o*), световода (*с*), диафрагм (*d*) и приемника (*п*) при измерениях спектров оптического поглощения и фототермической ионизации; *б* — схема разрезания образца германия.

толщина образца практически совпадает с *d*. Для доказательства сказанного был проделан эксперимент, в котором измерялись ФТИ спектры образца Ge ($N_A - N_D = 5.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$), поперечные размеры которого последовательно уменьшались (рис. 4, б). Результат показан на рис. 5, на котором приведена *B*-линия

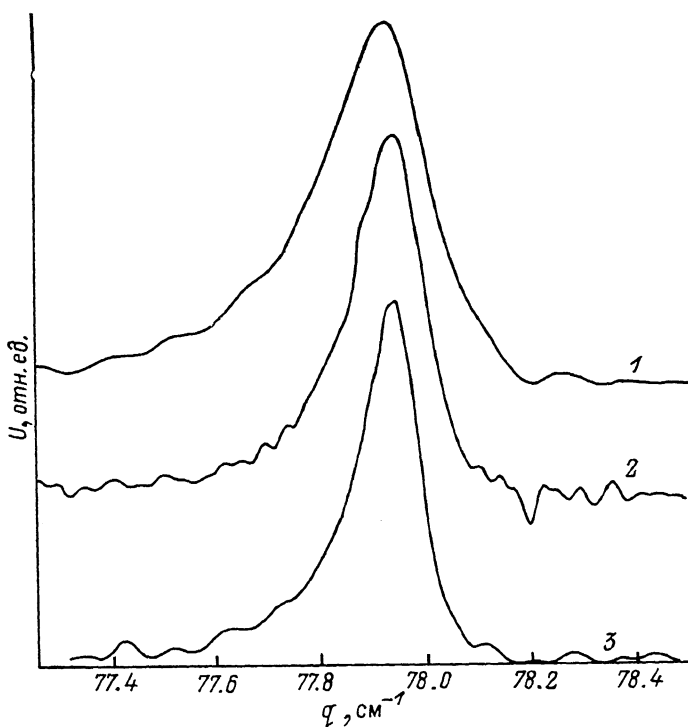


Рис. 5. Форма *B*-линии Al в образцах, полученных разрезанием пластинки по схеме рис. 4, б. Ширина линии, см^{-1} : 1 — 0.25, 2 — 0.16, 3 — 0.13.

Al из спектров образцов 1—3 (рис. 4, б). Видно, что уменьшение поперечных размеров образца, в том числе и той его части, которая при измерениях не облучается, приводит к уменьшению ширин линий в спектрах ФТИ. При этом, ширина линий в ФТИ спектре образца 3 (рис. 4) с наименьшими размерами равна таковой в оптических спектрах.

Используя выражение для количества (*I*) поглощенного излучения

$$I = I_0(1 - R) \frac{1 - \exp(-ad)}{1 - R \exp(-ad)} \quad (1)$$

(I_0 — интенсивность падающего на образец излучения, R — коэффициент отражения), можно определить «эффективную толщину» образца $d_{\text{эфф}}$, определяющую ширину линий в ФТИ спектре, а также рассчитать зависимость ширины линий от концентрации поглощающей примеси. Будем считать (соответственно данным экспериментов) линию лоренцевой:

$$\alpha(\nu) = \frac{fSN}{\pi\Gamma} \frac{1}{\left[\frac{h\nu - h\nu_0}{\Gamma}\right]^2 + 1}, \quad (2)$$

где S — площадь под всем спектром поглощения в расчете на один атом примеси (для акцепторов в германии $S = 3.01 \cdot 10^{-12}$ см), f — сила осциллятора оптического перехода, соответствующего данной линии (по нашим измерениям для C -линии алюминия $f = 0.06$), ν_0 — положение вершины линии на шкале частот, Γ — полуширина линии поглощения на полувысоте, см $^{-1}$. Подставляя (2) в (1) и используя уравнение $I(\nu_0 + \Delta\nu/2)/I(\nu_0) = 0.5$, получим выражение для зависимости обратной ширины линии $I/\Delta\nu$ от N , которое описывает полученные экспериментальные данные, приведенные на рис. 3.

Из изложенного следует, что при использовании метода ФТИ спектроскопии для обеспечения высокого разрешения, для регистрации истинной формы линий и правильной оценки однородности и других качеств высокочистых полупроводниковых материалов по ширине линий фототермической ионизации необходимо учитывать не только толщину, но и другие размеры образцов, которые могут существенно влиять на результаты измерений.

Список литературы

- [1] Kogan Sh. M., Lifshits T. M. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 39. P. 11—39.
- [2] Ramdas A. K., Rodriguez S. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 1297—1387.
- [3] Берман Л. В., Коган Ш. М. // ФТП. 1987. Т. 21. С. 1537—1554.
- [4] Лифшиц Т. М., Лихтман Н. П., Сидоров В. И., Сушко Т. Е. // Зав. лаб. 1971. № 8. С. 916—919.
- [5] Кальфа А. А., Коган Ш. М. // ФТП. 1976. Т. 10. С. 1216—1218.
- [6] Кальфа А. А. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 6. С. 1184—1187.

Институт химии высокочистых веществ
АН СССР
Нижний Новгород

Получена 10.01.1991
Принята к печати 11.01.1991