

ходит модификация арсенида галлия. Его свойства (спектральный состав люминесценции и скорость травления) отличаются от свойств исходного кристалла. Отметим, что если восстановление спектрального состава излучения происходит после стравливания $20 \div 30$ мкм, то полное восстановление интенсивностей полос достигается лишь на глубине $120 \div 150$ мкм. Выяснение природы полосы D требует дополнительных экспериментальных исследований.

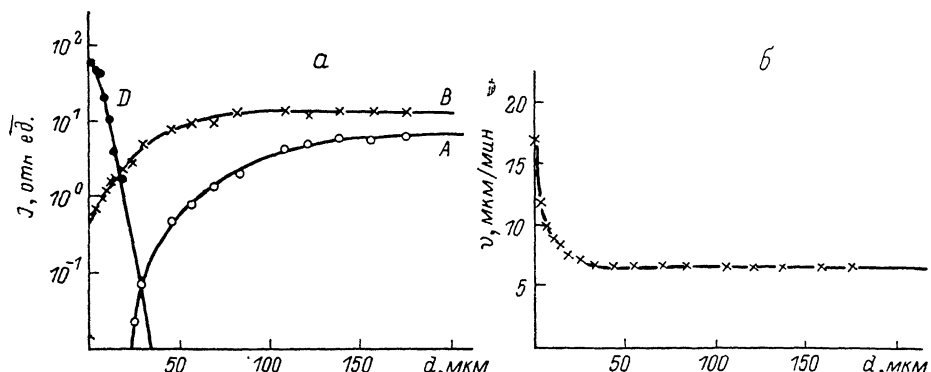


Рис. 2. Координатные изменения интенсивностей излучения полос A , B и D (а) и скорости травления (б) облученных кристаллов $\text{GaAs}\langle\text{Te}\rangle$.

Л и т е р а т у р а

- [1] Курбатов Л. Н., Стоянова И. Г., Трохимчук П. П., Трохин А. С. — ДАН СССР, 1983, т. 268, в. 3, с. 594—597.
- [2] Арутюнов Е. Н., Ковальчук Ю. В., Погорельский Ю. В., Портной Е. Л., Смольский О. В. — Письма ЖТФ, 1983, т. 9, в. 21, с. 1298—1301.
- [3] Савицкий Г. В., Кияк С. Г., Гафийчук В. В., Нарольский А. Ф. — УФЖ, 1985, т. 30, в. 2, с. 260—263.
- [4] Хайбуллин И. Б., Смирнов Л. С. — ФТП, 1985, т. 19, в. 4, с. 569—591.
- [5] Громов Г. Г., Руденко К. В., Уфимцев В. Б. — ЖТФ, 1986, т. 56, в. 10, с. 1998—2000.
- [6] Наследов Д. Н., Царенков Б. В. — В кн.: Тр. IX Межд. конф. по физике полупроводников. М., 1968.
- [7] Logan R. M. — J. Phys. Chem. Sol., 1971, v. 32, p. 1755.
- [8] Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Под ред. В. Д. Луфта. М., 1982. 136 с.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 28.01.1988
Принято к печати 2.06.1988

ФТП, том 22, вып. 10, 1988

ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ В ZnIn_2Se_4

Мехтиев Н. М., Алиев Г. М., Гусейнов З. З.

В работе [1] на основе исследований стационарных характеристик фотопроводимости нами показано, что при оптическом возбуждении рекомбинация неравновесных носителей в ZnIn_2Se_4 осуществляется быстрыми (s) и медленными (r) центрами рекомбинации. Однако стационарные характеристики фототока недостаточны для установления зарядового состояния и определения индивидуальных параметров соответствующих центров. Исследования релаксации неравновесных фотоносителей при возбуждении полупроводника короткими импульсами собственного света позволяют наиболее полно изучить механизм рекомбинации и определить параметры локальных центров. Настоящая работа, в которой представлены результаты исследования кинетических характеристик

фототока в широкой области изменения интенсивности излучения и температуры, в этом смысле является логическим продолжением исследований фотоэлектрических свойств $ZnIn_2Se_4$.

Монокристаллы $n-ZnIn_2Se_4$ были получены методом химических транспортных реакций с применением в качестве переносчика кристаллического иода. Неравновесные фотоносители создавались облучением естественной поверхности образцов (112) одиночными импульсами азотного лазера ЛГИ-21 ($\lambda=0.337$ мкм). Длительность импульса излучения ($\sim 10^{-8}$ с) можно считать достаточно короткой [2], так как время релаксации основных носителей в фоточувствительных полупроводниках обычно меньше 10^{-6} с. Поскольку энергия фотонов излучения лазера намного превышает значение ширины запрещенной зоны $ZnIn_2Se_4$ ($\varepsilon_g \approx 1.93$ эВ [3]), неравновесные носители образуются в приповерхностной области образца, и, в принципе, они могут вести себя иначе, нежели в объеме. Сравнение фотоэлектрических характеристик $ZnIn_2Se_4$ при объемном [1] и поверхностном возбуждении показывает удовлетворительное согласие температурных и люксовых характеристик. Это, с одной стороны, свидетельствует о высоком качестве естественной поверхности (112), а с другой стороны, позволяет использовать короткие импульсы лазера ЛГИ-21 для установления схемы рекомбинаций фотоносителей в $ZnIn_2Se_4$. Наличие уровней прилипания [4] и долговременных эффектов [5] в $ZnIn_2Se_4$ вызывает искажение кривых релаксации, для устранения чего образцы освещались непрерывным собственным светом.

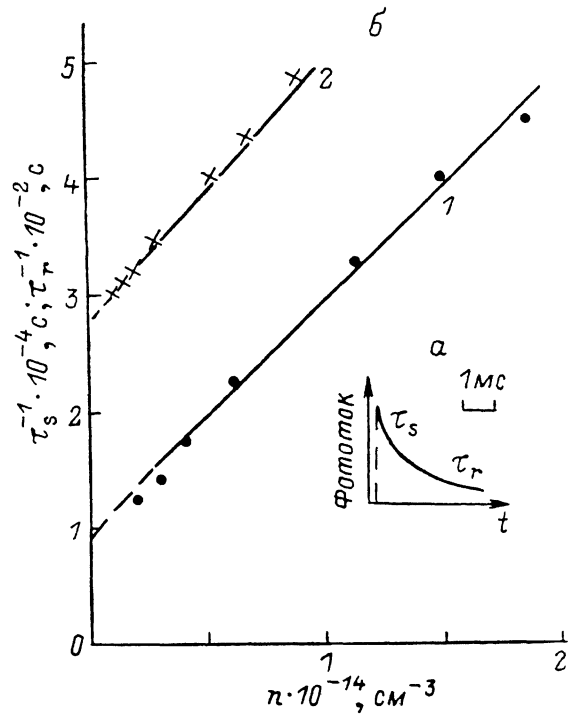


Рис. 1.

a — импульс фототока при 77 К, *б* — концентрационные зависимости τ_s^{-1} (1) и τ_r^{-1} (2).

При низких температурах, когда термическое гашение собственной фотопроводимости отсутствует [1], релаксация фототока в $ZnIn_2Se_4$ состоит из двух компонент — быстрой и медленной (рис. 1, *a*). Поскольку за время действия импульса ($\sim 10^{-8}$ с) неравновесные дырки уже захватываются центрами рекомбинации, можно считать, что быстрые и медленные участки релаксации являются «автономными» для *s*- и *r*-центров соответственно. Амплитуда быстрых и медленных участков определяется парциальными выходами рекомбинационных центров g_s и g_r [2]. При этом после окончания импульса релаксация неравновесных электронов определяется выражением [2]

$$\Delta n \sim g_s \exp(-t/\tau_s) + g_r \exp(-t/\tau_r), \quad (1)$$

где τ_s и τ_r — время релаксации электронов *s*- и *r*-центрами, и состоит из двух экспоненциальных участков с резко различными временами ($\tau_s \ll \tau_r$). Наличие быстрого участка в кинетике фототока при низких температурах обусловлено изменением дырочного заполнения *s*- и *r*-центров при использовании коротких импульсов. Амплитуда медленного участка зависит от степени фоточувствительности полупроводника и определяется соотношением концентрации *s*- и *r*-центров и их начального заполнения. Температурная и люксо-

вая зависимости τ_r и τ_s , позволяющей определить индивидуальные параметры τ_r и τ_s и r -центров.

На рис. 2, а представлены временные зависимости фототока в ZnIn_2Se_4 медленного и быстрого участков при 77 К и различных интенсивностях. Как видно из рисунка, наклоны кривых, из которых определены значения τ_r и τ_s , зависят от концентрации фотоэлектронов. Концентрационные зависимости τ_r^{-1} и τ_s^{-1} представлены на рис. 1. Как следует из рис. 1, при слабых и средних интенсивностях выполняется линейная зависимость, согласно выражениям [2]

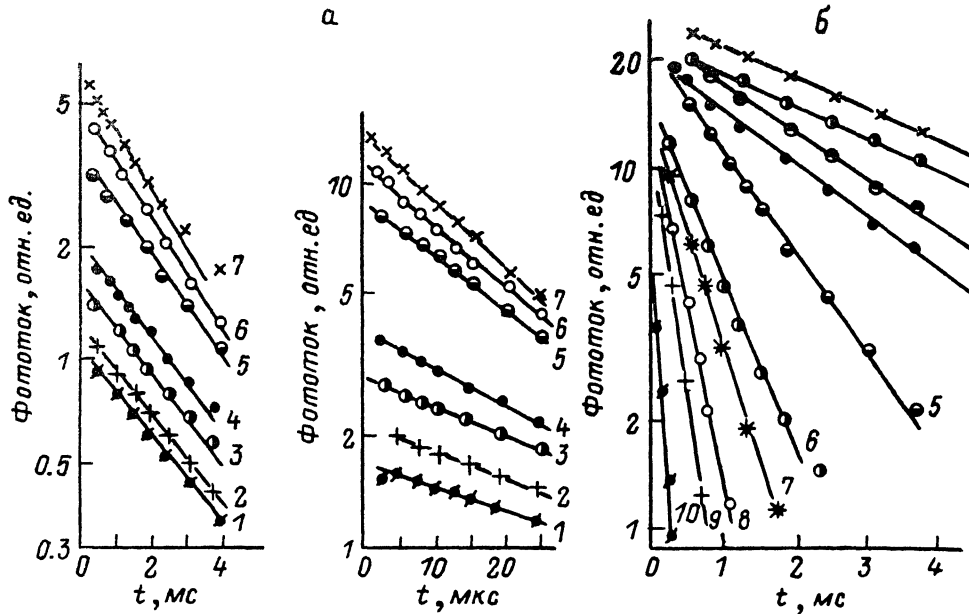


Рис. 2.

Кривые релаксации фототока: а — медленного и быстрого компонентов при различных интенсивностях ($T=77$ К, интенсивность возбуждения с ростом порядкового номера кривых увеличивается); б) при различных температурах, К: 1 — 77, 2 — 100, 3 — 110, 4 — 121, 5 — 131, 6 — 145, 7 — 153, 8 — 170, 9 — 200, 10 — 240.

$$1/\tau_r = C_{nr} (2n + P_r^0), \quad 1/\tau_s = C_{ns} (u + P_s^0), \quad (2)$$

где $C_{r,s}$ — коэффициенты захвата электрона, $P_{r,s}^0$ — дырочное заполнение r - и s -центров. По наклонам зависимостей (2) из рис. 1 можно определить C_{nr} и C_{ns} , которые оказываются $C_{nr} \approx 2.5 \cdot 10^{-12}$ и $C_{ns} \approx 2 \cdot 10^{-10}$ см³/с. Учитывая, что коэффициенты захвата определяются в виде $C_{r,s} = S_{r,s} v$, где v — тепловая скорость, для сечения захвата электронов r - и s -центрами получаем $S_{nr} \approx 2.5 \cdot 10^{-19}$ и $S_{ns} \approx 2 \cdot 10^{-17}$ см². Сечение захвата дырок r -центрами было определено с использованием значения S_{nr}/S_{pr} [1] и оказалось $S_{pr} \approx 10^{-15}$ см². Найденные значения S_{nr} и S_{pr} позволяют предположить, что r -центры в ZnIn_2Se_4 являются однозарядными акцепторами. Захват дырок происходит в притягивающем кулоновском поле, а захват электрона — нейтральными центрами. Формулы (2) справедливы начиная с интенсивностей, при которых уже произошла перелокализация дырок с s - на r -центры. По этой причине прямолинейные участки зависимостей $\tau_r^{-1}(n)$ и $\tau_s^{-1}(n)$ отсекают от оси ординат ($n=0$), согласно (2), отрезки $C_{nr} P_r^0$ и $C_{ns} P_s^0$. Значения P_r^0 и P_s^0 , найденные по известным значениям C_{nr} и C_{ns} , оказываются равными $P_s^0 \approx 5 \cdot 10^{13}$, $P_r^0 \approx 10^{14}$ см⁻³. Последнее значение удовлетворительно согласуется со значением P_r^0 , определенным из стационарных характеристик фототока [1].

Релаксация фототока в ZnIn_2Se_4 при различных температурах представлена на рис. 2, б. Как видно, в области температур 77—125 К, где отсутствует термическое гашение фототока [1], τ_r меняется незначительно. Существенное изменение τ_r происходит при $T \geq 125$ К, когда в ZnIn_2Se_4 происходит термическое гашение фотопроводимости. При этом τ_r экспоненциально уменьшается с

термических ионизации r -центров и усиления рекомбинации r -центрами. При высоких температурах, когда r -центры полностью ионизируются, рекомбинация управляется s -центрами и в релаксации фототока медленный участок исчезает. Если учесть, что при росте температуры в ZnIn_2Se_4 изменяется концентрация свободных электронов вследствие ионизации донорных уровней и уровней прилипающих [6], определить глубину залегания r -центров по температурной зависмости τ_r трудно.

В заключение можно прийти к выводу, что фоточувствительность нелегированных монокристаллов ZnIn_2Se_4 обусловлена присутствием в запрещенной зоне на расстоянии ~ 0.54 эВ от потолка валентной зоны однозарядных акцепторных уровней, как и в случае CdIn_2Se_4 [7]. Сечения захвата дырок r -центрами в CdIn_2Se_4 и ZnIn_2Se_4 мало различаются. Однако сечение захвата электронов в ZnIn_2Se_4 оказывается в десятки раз меньше, чем в CdIn_2Se_4 , что делает ZnIn_2Se_4 одним из самых фоточувствительных среди соединений $\text{A}^{II}\text{B}_2^{\text{VI}}\text{C}_4^{\text{VI}}$ [8, 9]. Возможно, по сравнению с CdIn_2Se_4 в ZnIn_2Se_4 отсутствуют благоприятные условия для образования антиструктурных дефектов [9].

Л и т е р а т у р а

- [1] Мехтиев Н. М., Гусейнов З. З., Салаев Э. Ю. — Изв. АН АзССР, сер. физ.-тех. и мат. наук, 1984, № 6, с. 72—75.
- [2] Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнман М. К. Неравновесные процессы в фотопроводниках. Киев, 1981. 264 с.
- [3] Мехтиев Н. М., Гусейнов З. З., Салаев Э. Ю. — ФТП, 1984, т. 18, в. 6, с. 1088—1090.
- [4] Manca P., Raga F., Spiga A. — Nuovo Cimento, 1974, v. 198, N 1, p. 15—28.
- [5] Filipowicz J., Romeo N., Tarricone L. — Sol. St. Commun., 1981, v. 28, N 7, p. 619—623.
- [6] Мехтиев Н. М., Гусейнов З. З. — ФТП, 1988, т. 22, в. 4, с. 700—703.
- [7] Мехтиев Н. М., Гусейнов З. З., Салаев Э. Ю. — ФТП, 1985, т. 19, в. 9, с. 1642—1646.
- [8] Fortin E., Raga F. — Sol. St. Commun., 1974, v. 14, N 9, p. 847—850.
- [9] Георгобини А. Н., Радаудан С. И., Тагиняну И. М. — ФТП, 1985, т. 19, в. 2, с. 193—212.

Институт физики АН АзССР
Баку

Получено 18.02.1988
Принято к печати 2.06.1988

ФТП, том 22, вып. 10, 1988

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОЛЯРИТОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА КРИСТАЛЛОВ GaAs

Жилаев Ю. В., Россин В. В., Россина Т. В., Травников В. В.

Исследование спектров низкотемпературной фотолюминесценции может быть источником обширной информации о различных параметрах кристаллов. Спектры люминесценции связанных экситонов и спектры донорно-акцепторной люминесценции характеризуют такие параметры кристалла, как степень компенсации, суммарная концентрация мелких примесей, их химическая природа (см., например, [1, 2]). Кинетические параметры прямозонных кристаллов могут быть определены по форме спектров поляритонной люминесценции (ПЛ) [3]. Причем это может быть сделано при стационарных условиях возбуждения без проведения сложных экспериментов по непосредственному исследованию кинетики процессов энергетической релаксации, рассеяния и пространственной диффузии. Связано это с тем, что спектры ПЛ в значительной мере определяются пространственно-энергетической функцией распределения поляритонов. При этом даже слабые изменения этой функции сильно проявляются в спектре ПЛ из-за больших абсолютных значений коэффициента поглощения и острых спектральных зависимостей коэффициентов пропускания и поглощения. В данной работе показана возможность использования спектров ПЛ для оценки качества кристаллов GaAs.