

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев А. П., Надолинный В. А., Гусев В. А. Влияние облучения на свойства монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{RO}_{20}$ ($\text{R} = \text{Ge}, \text{Si}, \text{Ti}$).— В кн.: Тез. докл. X Уральского совещания по спектроскопии. Свердловск, 1980.
2. Гудаев О. А., Гусев В. А., Детиненко В. А., Елисеев А. П., Малиновский В. К. Уровни энергии в запрещенной зоне кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Автометрия, 1981, № 5.
3. Yelisseyev A. F., Nadoliny V. A., Gusev V. A. Vacancy centers in $\text{Bi}_{12}\text{RO}_{20}$ ($\text{R} = \text{Si}, \text{Ti}, \text{Ge}$) single crystals.— In: Proc. Int. Conf. "Defects in Insulating Crystals". Riga: Zintnane, 1981.
4. Елисеев А. П., Надолинный В. А., Гусев В. А. Вакансионные центры в монокристаллах $\text{Bi}_{12}\text{RO}_{20}$ ($\text{R} = \text{Si}, \text{Ti}, \text{Ge}$).— Журн. структурн. химии, 1982, т. 23, № 3.
5. Lauer R. B. Electron effective mass and conduction-band effective density of states in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— J. Appl. Phys., 1974, vol. 45, N 4.
6. Ермаков М. Г., Хомич А. В., Петров П. И., Горн И. А., Куча В. В. Локальные центры в кристаллах силиката висмута.— Микроэлектроника, 1982, т. 11, вып. 5.
7. Детиненко В. А. Исследование диффузионных процессов в многослойных структурах методом анодного потенциала.— Автометрия, 1976, № 4.
8. Hou S. L., Lauer R. B., Aldrich R. E. Transport processes of photoinduced carriers in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— J. Appl. Phys., 1973, vol. 44, N 6.
9. Lauer R. B. Thermally stimulated currents and luminescence in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 5.
10. Peltier M., Micheron T. Volume hologram recording and charge transfer process in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.— J. Appl. Phys., 1977, vol. 48, N 9.
11. Кизель В. А., Бурков В. И., Красилова Ю. И., Козлова Н. А., Сафонов Р. М., Батог В. Н. О гидротронии кристаллов типа силленит.— Опт. и спектр., 1973, т. 34, вып. 6.
12. Гудаев О. А., Гусев В. А., Деменко С. И. Влияние предварительной подсветки на запись оптической информации в МДПДМ структуре на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Автометрия, 1983, № 5.
13. Камшилин А. А. Нелинейные явления при голографической записи в фоторефрактивных кристаллах LiNbO_3 и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук.— Л.: ЛФТИ, 1982.
14. Abrachams S. C., Jamieson P. B., Bernstein J. L. Crystal structure of piezoelectric bismuth germanium oxide $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.— J. Chem. Phys., 1967, vol. 47, N 10.
15. Скориков В. М., Каргин Ю. Ф., Марьин А. А. Кристаллохимия пьезоэлектрических соединений со структурой типа силленита.— В кн.: Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезоэлектрических материалов (Тез. докл. I Всесоюз. конф., 12—14 ноября 1981 г.) М., 1981.
16. Хенней Н. Химия твердого тела.— М.: Мир, 1971, с. 52—61.

Поступила в редакцию 22 апреля 1983 г.

УДК 538.311.1

О. А. ГУДАЕВ, В. А. ГУСЕВ, С. И. ДЕМЕНКО
(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СИЛЛЕНИТАХ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

В последнее время в ряде публикаций, посвященных исследованию материалов, принадлежащих к классу силленитов, отмечается, что предварительное облучение их светом из различных спектральных областей приводит к изменению спектра оптического поглощения и фоточувствительности кристаллов [1, 2]. Целенаправленное исследование этого вопроса имеет важное значение для понимания работы приборов, использующих в качестве активного элемента силлениты германия и кремния.

В данной работе приведены результаты исследования долговременных изменений оптических и фотоэлектрических свойств силленитов, заключающиеся в следующем: величина фототока и его спектр существенно зависят от того, светом какой длины волны были предварительно экспонированы кристаллы; наблюдаются разгорание ИК-люминесценции

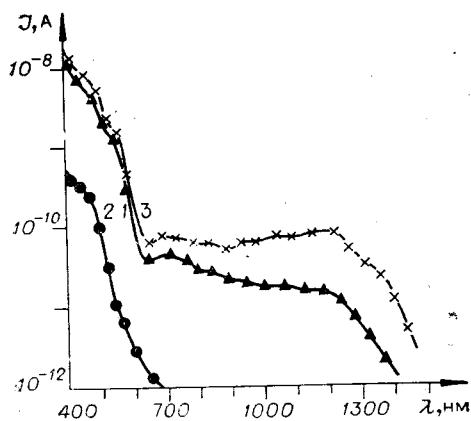


Рис. 1. Спектральная зависимость фототока в BSO, предварительно экспонированных белым (1), красным (2), синим (3) светом.

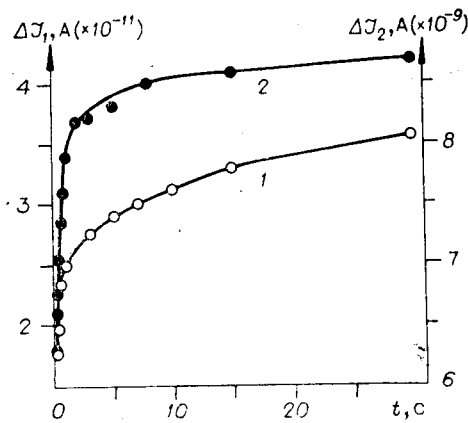


Рис. 2. Кинетика гашения фототока при экспонировании BSO красным светом на длинах волн: 1 — 0,7; 2 — 0,45 мкм, $\Delta J = J_0 - J_t$, где J_0, J_t — величина фототока до и после экспонирования BGO красным светом в течение времени t .

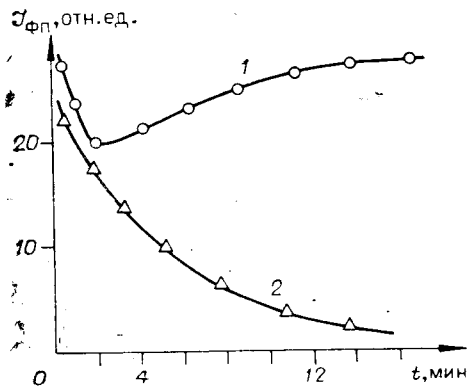


Рис. 3. Изменение фототока в зависимости от времени экспозиции светом: 1 — 0,7; 2 — 0,44 мкм.

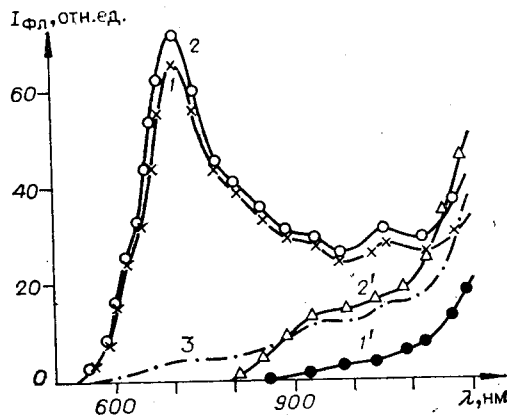


Рис. 4. Спектр фотолуминесценции в BSO при возбуждении светом с $\lambda = 0,436$ (1, 2), 0,546 мкм (1', 2'): 1, 1' — без ИК-подсветки, 2, 2' — после ИК-подсветки, $T = 80$ К; 3 — 300 К.

при облучении силленитов светом с $\lambda > 0,6$ мкм, а также немонотонное нарастание фототока при включении света. Эти явления анализируются в рамках единой модели, основанной на зонной энергетической диаграмме материала [1]. Для обоснования этой модели привлекаются результаты по термостимулированной люминесценции (ТСЛ).

Эксперименты проводились на кристаллах силиката (BSO) и германата (BGO) висмута. В качестве контактов использовались прозрачные (In_2O_3) и жидкие (вода, глицерин) электроды и электронный луч [3]. Спектры фотопроводимости (ФП) кристаллов измерялись на установке, состоящей из решетчатого монохроматора и электрометрического вольтметра для регистрации тока. На рис. 1 показан спектр ФП BGO (кривая 1), предварительно не подвергавшегося специальному экспонированию. Фоточувствительность кристалла при комнатной температуре начинает проявляться от $\lambda \approx 1,4$ мкм. Здесь же приведены спектры фототока BGO, предварительно экспонированного красным ($\lambda = 0,63$ мкм, кривая 2) и синим ($\lambda < 0,45$ мкм, кривая 3) светом. Фоточувствительность образцов после облучения красным светом уменьшается в несколько де-

сятков раз во всей области спектральной чувствительности материала. Состояние с пониженной чувствительностью сохраняется в темноте в течение длительного времени (>10 ч) без заметных изменений. В исходное состояние кристалл возвращается после облучения его белым светом. Фоточувствительность образца, экспонированного синим светом, увеличивается в диапазоне $0,36 \div 1,5$ мкм, $T = 298$ К. При азотных температурах ФП кристаллов, облученных синим светом, начинает проявляться с $\lambda = 2,0$ мкм (см. рис. 6). В темноте кристалл возвращается в исходное состояние с характерным временем порядка нескольких часов (298 К). Изменение фоточувствительности не зависит от того, приложено или нет к образцу напряжение во время предварительного облучения. На рис. 2 показана кинетика уменьшения величины фототока для длин волн 0,7 и 0,45 мкм в зависимости от экспозиции светом с $\lambda = 0,63$ мкм. Скорость изменения фоточувствительности уменьшается с увеличением времени экспонирования, а фототок стремится к постоянной величине.

Поведение фототока после включения света имеет сложный характер, зависящий как от предыстории образца, так и от длины волны падающего света (рис. 3). В области спектра с $\lambda > 0,6$ мкм фототок монотонно уменьшается (кривая 1) с характерным временем, определяющимся интенсивностью падающего света. В области спектра с $\lambda < 0,54$ мкм после некоторого спада начинается рост фототока (кривая 2). Величина спада зависит от того, экспонировался образец предварительно или нет: экспонирование синим светом уменьшает глубину спада, облучение красным светом увеличивает ее.

Предварительное облучение кристаллов светом определенного спектрального состава оказывает сильное влияние на люминесценцию силленитов. На рис. 4 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) кристаллов, предварительно не облучавшихся (кривая 1) и экспонированных (кривая 2) ИК-светом. При облучении кристаллов ИК-светом увеличивается интенсивность ФЛ (будем называть это ИК-разгоранием люминесценции).

Обсуждение. Как отмечалось выше, в некоторых работах уже сообщалось о воздействии предварительного излучения на свойства силленитов. Так, в [2] показано, что предварительное ИК-экспонирование кристалла приводит к увеличению дифракционной эффективности записываемых голограмм и уменьшению фотопроводимости в этих материалах. При обсуждении авторы использовали двухуровневую модель, не приводя согласования ее с реальной энергетической зонной диаграммой материала. Однако имеют место попытки объяснить сложную кинетику фототока при включении света явлениями, связанными с сильным полем в приконтактной области. Ранее в ряде работ было показано, что электроды (во всяком случае использованные нами) образуют с кристаллами BSO и BGO контакт запирающего типа [3]. Модуляция глубины области пространственного заряда в результате различного рода воздействий (свет, тепло, поле) приводит к целому ряду нелинейных явлений [4]. Прежде всего необходимо было выяснить, с чем связаны перечисленные выше эффекты: с объемными свойствами силленитов или с явлениями в области контактов. С этой целью были проведены дополнительные эксперименты. Кристалл BSO, в котором предварительно была погашена фоточувствительность в результате экспонирования его красным светом, облучался светом из области края основной полосы поглощения ($\sim 0,38$ мкм). Свет с такой длиной волны поглощается в приповерхностной части образца. Освещение кристалла производилось как во внешнем поле, так и без поля со стороны катода и анода и катода одновременно. Ни в одном из этих случаев свет, поглощающийся лишь вблизи поверхности кристалла, не восстанавливает его фоточувствительности. В то же время свет с $\lambda \geq 0,45$ мкм восстанавливает фоточувствительность образцов как с приложенным внешним полем, так и без него. Этот результат свидетельствует о том, что изменение ФП в процессе экспонирования не связано с эффектами сильного поля вблизи электрода.

В работе [4] обнаружено явление переключения на люкс-амперной характеристике (ЛАХ) ВГО с прозрачными электродами. Эффект объясняется тем, что в результате диффузии металла электродов в кристалл образуются переходные слои с пониженной фоточувствительностью. Свет приводит к перераспределению поля между этими слоями и объемом и в итоге — к их «пробое» и выравниванию поля. Данный эффект, являясь сугубо контактным, тем не менее требует, чтобы свет проникал во весь объем кристалла. Для выяснения роли эффекта переключения в рассматриваемых явлениях были измерены ЛАХ ВГО в структуре с прозрачными (In_2O_3) и водяными электродами. В первом случае, как и ранее в [4], наблюдалось переключение, начинавшееся при токах $\sim 2 \cdot 10^{-10}$ А ($d = 1$ мм, $S = 1$ см²). С увеличением поля пороговая интенсивность света уменьшалась. Характерное время переключения велико: $\geq 10^2$ мин. В структуре с водяными электродами переключение не наблюдалось, во всяком случае до токов $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ А. ЛАХ в области спектра с $\lambda > 0,6$ мкм линейна, а для $\lambda < 0,5$ мкм — ниже линейной. Данные эксперименты показывают, что рассматриваемые явления не связаны с переключением.

Независимым подтверждением объемного характера эффекта индуцированного светом изменения фоточувствительности являются эксперименты, проведенные в установке электронного контакта (ЭК). Электронный луч, выполняя роль катода, обеспечивает инжектирующий контакт. ЛАХ в структуре ЭК(ВГО)М линейны во всей области фоточувствительности (минус на ЭК). В структуре с ЭК так же, как и в структурах с жидкими и прозрачными электродами, наблюдаются гашение фоточувствительности красным и восстановление ее синим светом.

Таким образом, проведенные выше эксперименты показывают, что рассматриваемые фотоиндуцированные эффекты имеют объемный характер. Величина фототока $\Delta \mathcal{J}$ в данном случае определяется выражением

$$\Delta \mathcal{J} = e \mu E \Delta N. \quad (1)$$

Если подвижность свободных носителей μ и поле E слабо зависят от интенсивности света и длины волны λ , то изменение $\Delta \mathcal{J}$ может быть связано лишь с изменением концентрации фотоэлектронов

$$\Delta N = \alpha; I; \tau, \quad (2)$$

где α — коэффициент поглощения, I — интенсивность падающего света, τ — время жизни фотоэлектронов. В случае «примесного» поглощения

$$\alpha = S_{\text{opt}} N_{\alpha}. \quad (3)$$

Здесь S_{opt} — сечение поглощения света электронами на рассматриваемом уровне в запрещенной зоне, N_{α} — концентрация электронов на этом же уровне. В работах [1, 5] описан фотохромный эффект, наблюдавшийся в силленитах. Эффект заключается в том, что при температурах $T \leq 100$ К поглощение кристаллов в области плеча сильно увеличивается при облучении их светом с $\lambda < 0,6$ мкм. Однако при комнатной температуре изменения величины α , во всяком случае в видимой области спектра, малы и не могут полностью объяснить фотоиндуцированные эффекты в ФП.

Время жизни неравновесных электронов в зоне проводимости определяется выражением

$$\tau = [S v_{\text{th}} (N_0 - N)]^{-1}, \quad (4)$$

где S — сечение захвата электрона центром рекомбинации, v_{th} — тепловая скорость, N_0 — концентрация центров, N — концентрация электронов на центрах рекомбинации. При наличии нескольких каналов рекомбинации эффективное время жизни $\tau_{\text{эф}}$ определяется уровнями, которым соответствует наименьшее время жизни электронов в зоне свободных состояний:

$$\tau_{\text{эф}}^{-1} = \tau_1^{-1} + \tau_2^{-1} + \dots + \tau_n^{-1} \cong \tau_{\text{min}}^{-1}. \quad (5)$$

В работе [1] на основе измерений оптического спектра, спектров ФП,

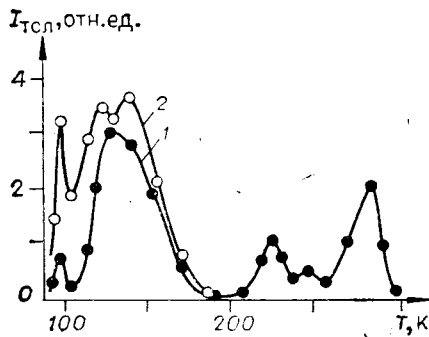


Рис. 5. Кривая ТСЛ в BSO:
1 — без ИК-подсветки, 2 — после ИК-подсветки,
 $\lambda_{\text{возб}} = 0,436$ мкм.

ФЛ, ТСЛ и ТСТ построена диаграмма энергетических состояний в запрещенной зоне силленитов. Для того чтобы выяснить, с какой группой уровней связан основной канал рекомбинации, проведем анализ экспериментальных результатов по ТСЛ, ИК-гашению ФЛ и ИК-разгоранию ФЛ. Чтобы такое сравнение было возможным, необходимо знать, как соотносятся оптическая E_{opt} и термическая E_{th} глубины залегания уровней. Согласно мнению ряда авторов (например, [6, 7]), $E_{\text{opt}}/E_{\text{th}} \geq 2$. Этот вывод основан на модели, развитой в [7] для донорных центров в S -состоянии, дающих мелкие уровни в запрещенной зоне. Применимость такой модели для силленитов сомнительна.

В работе [8] проведено прямое экспериментальное сравнение оптической и термической глубин залегания для данной группы уровней. Кристалл, предварительно активированный синим светом, освещался ИК-светом. Монохроматором последовательно выделялись три диапазона: $\lambda = 2150 \div 1950$ нм, $\lambda = 1700 \div 1550$ нм и $\lambda = 1380 \div 1050$ нм. Каждый раз измерялся спектр ТСЛ и по нему определялись термические глубины залеганий уровней. Свет с $\lambda > 1,95$ мкм опустошает лишь группу уровней с $E_{\text{th}} = 0,62 - 0,68$ эВ (см. зонную диаграмму [1]), свет с $\lambda > 1,55$ мкм опустошает, кроме вышеуказанных, и уровни на глубине $0,72 - 0,78$ эВ, а свет с $\lambda > 1,05$ мкм освобождает электроны еще и с уровня $1,15$ эВ. Данный эксперимент позволяет считать $E_{\text{opt}}/E_{\text{th}} \approx 1$.

На рис. 5 приведены спектры ТСЛ для кристаллов, предварительно засвеченных синим светом (кривая 1) и предварительно облученных светом с $\lambda > 0,6$ мкм (кривая 2). Облучение красным светом опустошает группу уровней на глубине $0,7 \div 1,2$ эВ. При этом уменьшается ФЛ во всем спектральном диапазоне. Такое поведение ФЛ хорошо объясняется в случае, когда группа уровней на глубине $0,7 \div 1,2$ эВ является основным каналом рекомбинации (если эти уровни хотя бы частично пусты). Действительно, при комнатной температуре и предварительном активировании кристалла белым или синим светом уровни на глубине $0,7 \div 1,2$ эВ неравновесно заполнены и могут оставаться в этом состоянии очень долго. При освещении кристалла ИК-светом неравновесные электроны возвращаются через зону проводимости на более глубокие уровни. При этом рекомбинация через уровни $0,7 \div 1,2$ эВ, в том числе и излучательная, увеличивается, а ФЛ снижается за счет уменьшения τ согласно (4). Интенсивное ИК-разгорание ФЛ при $T = 80$ К (см. рис. 4) является убедительным подтверждением предложенной модели. При комнатной температуре имеет место только ИК-люминесценция, интенсивность которой также увеличивается при ИК-подсветке. Следует отметить, что для объяснения разгорания ФЛ при облучении кристалла красным светом (80 К) необходимо рассмотреть изменение заселенности и более глубоких уровней $1,75$ и $1,5$ эВ (см. рис. 4). Красный свет приводит к частичному опустошению уровней, и интенсивность излучательной рекомбинации через эти центры увеличивается. Чтобы выяснить, является ли данный канал рекомбинации существенным для ФЛ, произведено ее гашение светом с $\lambda \geq 1,0$ мкм. Свет с квантами такой энергии воздействует на группу уровней $0,7 \div 1,2$ эВ, но не изменяет заселенности более глубоких уровней. ФЛ при этом изменяется так же, как и при воздействии светом с $\lambda = 0,63$ мкм (см. рис. 1).

Изменение τ , а следовательно и фототока $\Delta \mathcal{I}$ (1), в зависимости от времени экспонирования красным светом вычислим, учитывая согласно (5) лишь один канал рекомбинации. Уменьшение концентрации неравно-

весных избыточных электронов на рекомбинационном уровне за время dt равно

$$dN = -\gamma I' S'_{\text{opt}} N dt, \quad \gamma = 1 - A, \quad (6)$$

где S'_{opt} — сечение оптического поглощения рекомбинационным центром на длине волны экспонирующего света интенсивностью I' , A — вероятность повторного захвата (предполагаем, что она слабо зависит от N). Тогда

$$N = N(0) \exp(-t/t_0), \quad t_0 = \gamma I' S'_{\text{opt}}. \quad (7)$$

Согласно (4)

$$\tau = \{Sv_{\text{th}}[N_0 - N(0) \exp(-t/t_0)]\}^{-1}. \quad (8)$$

Подставляя в (1) выражения (2), (3), (8), получим

$$\Delta \mathcal{J} = e\mu n E (S_{\text{opt}} I / Sv_{\text{th}}) [N_0 / (N_0 - N(0) \exp(-t/t_0))]. \quad (9)$$

При $t \sim 0$ и $N(0) \sim N_0$

$$\Delta \mathcal{J} \simeq \Delta \mathcal{J}_0 t_0 / t, \quad \Delta \mathcal{J}_0 = e\mu n E S_{\text{opt}} I / Sv_{\text{th}}. \quad (10)$$

При $t \rightarrow \infty$ $\Delta \mathcal{J}$ стремится к насыщению. На рис. 2 показан график изменения величины фототока на длинах волн 0,7 и 0,45 мкм в зависимости от времени экспонирования светом с длиной волны 0,63 мкм. Изменение $\Delta \mathcal{J}$ в зависимости от t качественно хорошо описывается выражением (9).

В рамках рассмотренной модели объясняется и поведение фототока при включении света. Длинноволновый свет приводит к освобождению канала рекомбинации и уменьшению τ , при этом фототок монотонно падает (см. рис. 3). Излучение с более короткой длиной волны должно приводить к росту ФП за счет увеличения τ . Неравновесная заселенность центров рекомбинации при этом увеличивается по закону

$$N = N(0)[1 - \exp(-t/t_0)], \quad (11)$$

а $\tau(t)$ и $\Delta \mathcal{J}(t)$ меняются согласно (4) и (1). Первоначальный спад $\Delta \mathcal{J}$ связан, видимо, с формированием барьера у катода. Это подтверждается нелинейностью ЛАХ в коротковолновой области спектра.

В приведенном выше обсуждении не рассматривалось изменение коэффициента поглощения α в процессе экспонирования. Как уже отмечалось, эти изменения в видимом диапазоне относительно невелики, и поэтому основной причиной сильных изменений ФП может быть только τ . Однако заселенность группы уровней, определяющих τ , должна меняться существенно, и относительные изменения величины поглощения в этой области спектра должны быть велики. Электроны, ушедшие с этих уровней, оседают на более глубоких, что проявляется в увеличении α в области «плеча» поглощения относительно небольшом из-за большой величины собственного поглощения). Измерение величины $\Delta \alpha$ при воздействии на нее красного света в спектральном диапазоне 0,4–1,2 мкм показало, что α в области «плеча» увеличивается на $\leq 4 \text{ см}^{-1}$, а в длинноволновой области соответственно уменьшается (подробнее см. [8]).

Заселенность уровней на глубине 0,7 ÷ 1,2 эВ, определяющих τ , можно изменять не только ИК-светом, но и прогревом кристалла до температуры, выше комнатной (см. рис. 5). На рис. 6 приведены спектры ФП ВГО, находящегося в исходном состоянии (кривая 1) и прогретого в темноте до $T \sim 100^\circ \text{C}$ (кривая 2). Здесь же представлен спектр ФП кристалла после экспонирования его малой дозой ИК-света (кривая 3). Фоточувствительность в длинноволновой области спектра уменьшилась. Некоторое увеличение ее в области плеча связано с конкурирующим возрастанием α , однако при больших экспозициях определяющим становится уменьшение величины τ , и соответственно ФП во всей области чувствительности кристаллов падает.

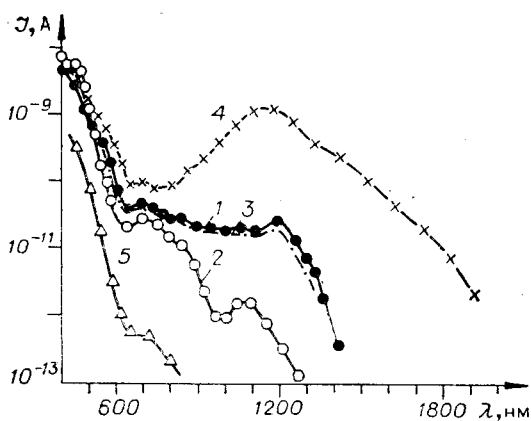


Рис. 6. Спектральная зависимость ФП для BSO экспонированных:

1 — белым светом; 2 — после прогрева до 400 К; 3 — красным (малая величина экспозиции) светом, 300 К; 4 — после облучения синим светом, 80 К; 5 — длительное облучение красным светом, 80 К.

Заключение. Таким образом, в работе показано, что воздействие света на кристаллы силленитов Ge и Si приводит к существенному изменению их фоточувствительности. Это связано с изменением эффективности рекомбинации фотовозбужденных носителей заряда. Наименьшее время жизни электронов при комнатной температуре обусловлено рекомбинацией через группу уровней на глубине $0,7 \div 1,2$ эВ. Свет с энергией квантов $\sim 2,3 \div 3,0$ эВ приводит к возбуждению электронов с уровней, соответствующих «плечу» поглощения, и увеличению степени заполнения уровней на глубине $0,7 \div 1,2$ эВ. При этом время жизни возрастает в несколько десятков раз. Такое состояние может сохраняться очень долго, так как характерное время освобождения электронов с уровней на такой глубине велико. Под действием длинноволнового света или температуры электроны с уровней $0,7 \div 1,2$ эВ возвращаются на более глубокие уровни вблизи валентной зоны. Это проявляется в увеличении (относительно небольшом) величины α в области «плеча» и уменьшении ее в ИК-области. Изменение времени жизни в результате воздействия света уменьшает или увеличивает фоточувствительность силленитов в несколько десятков раз во всей области спектральной чувствительности силленитов. При этом меняется также скорость излучательной рекомбинации, это проявляется в увеличении ИК-люминесценции при воздействии на кристалл красного или ИК-света.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. К. Малиновскому за проявленный интерес к работе и ценные обсуждения.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. К. Малиновскому за проявленный интерес к работе и ценные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудаев О. А. и др. Уровни энергии в запрещенной зоне кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. — Автометрия, 1981, № 5.
2. Камшилин А. А., Петров М. П. Инфракрасное гашение фотопроводимости и голографическая запись в силикате висмута. — ФТТ, 1981, т. 23, вып. 10.
3. Гудаев О. А., Косцов Э. Г., Малиновский В. К. Инжектирующий контакт к широкозонным диэлектрикам. — Автометрия, 1978, № 1.
4. Анцыгин В. Д., Гудаев О. А., Малиновский В. К. Нелинейный фотоотклик в структурах $\text{M}(\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20})\text{M}$. — Автометрия, 1980, № 1.
5. Елисеев А. П., Надолинный В. А., Гусев В. А. Влияние облучения на свойства монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{ЭO}_{20}$ ($\text{Э} = \text{Ge}, \text{Si}, \text{Ti}$). — В кн.: Тез. докл. X Уральского совещания по спектроскопии. Свердловск: Уральский научный центр АН СССР, 1980.
6. Lauer R. V. Electron effective mass and conduction-band effective density of states in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. — J. Appl. Phys., 1974, vol. 45, N 4.
7. Ермаков М. Г. и др. Локализованные центры в кристаллах силиката висмута. — Микроэлектроника, 1982, т. 11, вып. 5.
8. Гусев В. А., Детивенко В. А., Малиновский В. К., Соколов А. П. Фотохромный эффект и запись оптической информации в силленитах германия, кремния и титана. — Автометрия, 1983, № 5.

Поступила в редакцию 17 марта 1983 г.;
окончательный вариант — 25 апреля 1983 г.