

Кинетика фотолюминесценции GaAs под действием поверхностной акустической волны

© К.С. Журавлев[†], А.М. Гилинский, А.В. Царев, А.Е. Николаенко

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 17 января 2001 г. Принята к печати 30 января 2001 г.)

Проведено экспериментальное исследование кинетики низкотемпературной фотолюминесценции нелегированного GaAs под действием электрического поля поверхностной акустической волны. Показано, что приложение импульса поверхностной акустической волны с напряженностью поля до ~ 50 В/см, задержанного на 20–30 мкс относительно лазерного импульса, приводит к значительному (до 10–20 раз) возрастанию интенсивности переходов зона–акцептор при незначительном изменении интенсивности линий донор–акцептор и отсутствии возгорания экситонных переходов. Экспериментальные данные свидетельствуют об ионизации мелких доноров под действием электрического поля поверхностной акустической волны и подтверждают предложенную ранее модель механизма рекомбинации, объясняющую обнаруженное недавно длительное неэкспоненциальное затухание фотолюминесценции свободных электронов в чистом GaAs влиянием многократного захвата свободных электронов из зоны проводимости мелкими донорами.

Введение

К настоящему моменту механизмы и кинетика излучательной рекомбинации в арсениде галлия и близких полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ считаются хорошо изученными. Основываясь на имеющихся литературных данных, можно построить следующую картину релаксации неравновесных носителей заряда при гелиевых температурах после импульсного межзонного фотовозбуждения. Сначала в течение нескольких наносекунд кинетика краевой фотолюминесценции (ФЛ) GaAs контролируется образованием и излучательным распадом экситонов [1,2], а затем примесными переходами, причем из-за того, что сечение захвата свободных дырок мелкими акцепторами больше сечения захвата свободных электронов мелкими донорами [1], переходы (валентная зона)–донор должны затухать значительно раньше, чем переходы (зона проводимости)–акцептор. При этом следует ожидать, что при условии малости уровня возбуждения кривые затухания и тех и других переходов будут следовать экспоненциальному закону, что приведет к исчезновению линий зона–примесь в спектре ФЛ через несколько единиц или десятков микросекунд после выключения возбуждения [1,3]. Можно, следовательно, заключить, что по прошествии указанного времени в спектре будут присутствовать только линии донор–акцептор, демонстрирующие сравнительно медленное затухание [4]. Обычно интерпретация экспериментальных данных по кинетике примесной ФЛ в GaAs соответствует описанной схеме рассуждений. Так, в детальной работе по кинетике экситонной и примесной ФЛ [1] считалось, что кривые затухания переходов зона–акцептор, регистрируемые в интервале задержек 0–2 мкс, можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью, по-

зволяющей сопоставить экспериментально наблюдаемые и расчетные значения темпов переходов.

Недавно, однако, нами было обнаружено, что описанная картина релаксации возбуждения не учитывает существенных механизмов, определяющих кинетику рекомбинации свободных электронов в GaAs при низких температурах. Было экспериментально показано, что затухание ФЛ зона–акцептор в нелегированном или слабо легированном GaAs наблюдается вплоть до задержек в 1–2 мс и следует закону, близкому к степенному вида $I_{PL}(t) \propto 1/t^\alpha$, где $\alpha < 1$, весьма далекому от ожидаемого экспоненциального [5–9]. Эффект длительного затухания нестационарной ФЛ мелких акцепторов изменяет представление о доминирующих механизмах рекомбинации в GaAs при низких температурах и не может быть интерпретирован в рамках механизмов зона–примесной, межпримесной (донорно-акцепторной) и экситонной рекомбинаций, рассматриваемых как независимые. Для объяснения длительного затухания ФЛ зона–акцептор был использован механизм [9], аналогичный предложенному ранее при анализе кинетики люминесценции кристаллофосфоров [10,11]. Как было показано в работах [10,11], при наличии в материале центров, являющихся ловушками носителей заряда, и определенных соотношениях на вероятности рекомбинации, захвата и выброса носителей ловушками возможно возникновение длительного затухания люминесценции свободных носителей, характеризуемого законом, близким к степенному. В соответствии с этой моделью для наблюдения длительного затухания требуется, чтобы вероятность захвата носителей ловушками значительно превосходила вероятность его перехода на центр рекомбинации и вероятность термоэмиссии с ловушки, а степень заполнения ловушек в начальный момент затухания была близка к 100%. При этом благодаря многократному повторению захвата эмиттируемых с ловушек носителей затухание ФЛ наблюдается в тече-

[†] E-mail: zhur@thermo.isp.nsc.ru
Tel: (3832)343807
Fax: (3832)332771

ние промежутка времени, значительно превышающего время однократного пребывания носителя на ловушке. Согласно этой модели, для наблюдения затухания ФЛ зона-акцептор в миллисекундном диапазоне ловушки должны иметь времена термоэмиссии электронов в диапазоне сотен или единиц миллисекунд. Поскольку времена термоэмиссии электронов с глубоких уровней в GaAs при гелиевых температурах имеют величину в часы и месяцы [12], было высказано предположение, что в качестве обнаруженных ловушек в GaAs могут выступать мелкие доноры.

Для экспериментальной проверки предложенной модели и выяснения роли мелких доноров в возникновении эффекта длительного затухания в данной работе проведено исследование этого эффекта в условиях, обеспечивающих возможность модификации соотношения вероятностей захвата и эмиссии электронов ловушками. С этой целью было впервые выполнено исследование кинетики краевой ФЛ при приложении ионизирующего электрического поля, создаваемого поверхностной акустической волной (ПАВ), являющейся удобным средством для ионизации экситонов и мелких доноров в GaAs [13,14].

Методика эксперимента

Изучалась кинетика ФЛ образцов GaAs, выращенных на подложках полуизолирующего GaAs (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Приложение ПАВ к исследуемому образцу производилось по схеме, приведенной на рис. 1. Встречно-штыревой преобразователь (ВШП) был нанесен на кристалл ниобата лития, а исследуемый образец располагался вблизи его поверхности на расстоянии много меньше длины волны ПАВ и находился, таким образом, под действием электрического поля бегущей ПАВ, распространяющейся в ниобате лития [15]. Возбуждение и регистрация ФЛ производились сквозь ниобат лития, прозрачный на используемых длинах волн. Такая схема приложения ПАВ позволяет добиться почти в 100 раз большей эффективности преобразования подводимой в ВШП энергии по сравнению с вариантом, когда преобразователь наносится непосредственно на исследуемый образец [16], что обеспечивает значительное снижение тепловыделения на ВШП из-за омических потерь в нем. Максимум амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователя, содержащего 15 пар электродов, располагался на частоте 70 МГц, что соответствует длине волны ПАВ ~ 40 мкм. Время пробега ПАВ от ВШП до области фотогенерации равнялось 3 мкс. Определение напряженности электрического поля ПАВ в образце производилось путем расчета из величины амплитуды нормальной компоненты смещения ПАВ, которая находилась по данным измерения эффективности дифракции лазерного пучка на отражение от ПАВ, распространяющейся по поверхности кристалла ниобата лития. Напряженность электрического поля, индуцируемого в образце, изменя-

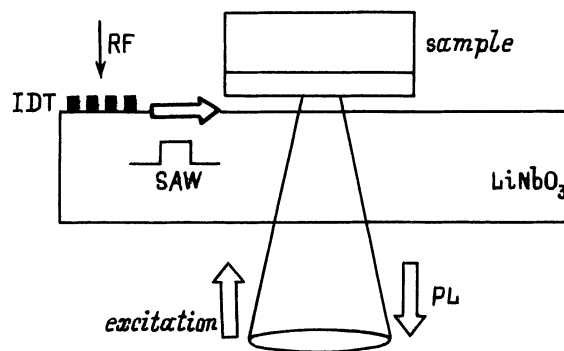


Рис. 1. Схема приложения поверхностной акустической волны к исследуемому образцу. Обозначения: IDT — встречно-штыревой преобразователь, RF — переменное напряжение, подаваемое на преобразователь, SAW — поверхностная акустическая волна, PL — люминесцентное излучение.

лась в пределах от 0 до 400 В/см. Измерялась кинетика ФЛ зона-акцептор, донор-акцептор и кинетика экситонной ФЛ под действием ПАВ. Измерения проводились в парах гелия при температуре 4.5–5 К. Возбуждение ФЛ производилось импульсным Nd:ИАГ лазером ЛТИ-701 с удвоением частоты излучения (длина волны 532 нм), длительностью импульсов на полувысоте 120–150 нс с частотой повторения импульсов 5 кГц. Диаметр пучка лазера на образце составлял 300 мкм. Рекомбинационное излучение, прошедшее двойной дифракционный монохроматор, регистрировалось охлаждаемым фотоэлектронным умножителем, работающим в режиме счета фотонов с временным разрешением. Прямоугольные импульсы ПАВ длительностью 2–10 мкс подавались с задержкой от 10 до 50 мкс относительно возбуждающего лазерного импульса.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2–4 представлены кривые затухания краевой ФЛ и эволюция спектра нестационарной примесной ФЛ образца нелегированного (намеренно) GaAs *p*-типа проводимости при приложении импульсов ПАВ. Толщина эпитаксиального слоя равнялась 5 мкм. По холловским данным, концентрация мелких акцепторов в слое составляла $N_A = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при уровне компенсации $\sim 1/3$.

На рис. 2 показаны кривые затухания ФЛ (зона проводимости)-акцептор под действием ПАВ. В отсутствие ПАВ (нижняя кривая) наблюдается длительное неэкспоненциальное затухание ФЛ. При включении ПАВ с напряженностью электрического поля выше 10 В/см наблюдается постепенное возрастание интенсивности переходов (зона проводимости)-акцептор в течение импульса ПАВ. При повышении напряженности поля возрастание интенсивности ФЛ ускоряется. После

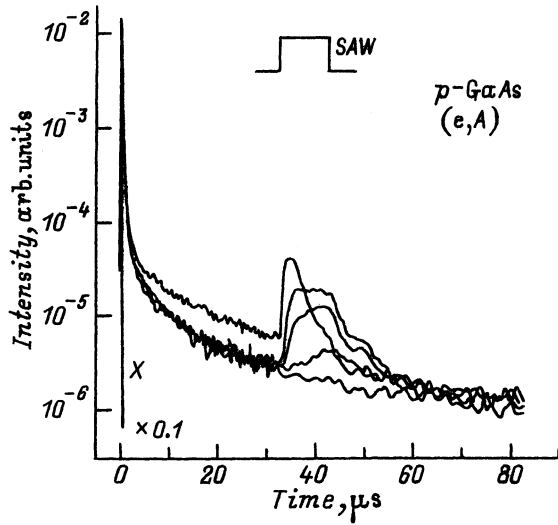


Рис. 2. Кривые затухания интенсивности переходов зона-акцептор (e, A) при приложении импульсов поверхностной акустической волны (ПАВ) различной амплитуды. Импульс ПАВ длительностью 10 мкс (показан на рисунке) задержан на 33 мкс относительно лазерного импульса. Кривые соответствуют напряженности электрического поля ПАВ, снизу вверх: 0, 10, 20, 30 и 100 В/см. Для сравнения показана кривая затухания экситонной ФЛ при приложении ПАВ с напряженностью поля 400 В/см (X).

выключения ПАВ происходит медленное (на масштабе десятков микросекунд) затухание ФЛ. Отметим, что при напряженности электрического поля свыше 50 В/см затухание начинается уже во время действия импульса ПАВ, а не после его окончания, как при меньших значениях напряженности поля.

В отличие от кривых затухания ФЛ зона-акцептор, вид кривых затухания переходов донор-акцептор при приложении ПАВ с напряженностью электрического поля до 30 В/см существенно не изменяется (рис. 3). При дальнейшем увеличении напряженности поля интенсивность переходов донор-акцептор в "хвостах" кривых затухания после импульса ПАВ постепенно снижается.

Кривая затухания экситонной ФЛ при приложении ПАВ с максимальной использованной амплитудой показана на рис. 5. Как видно из рисунка, приложение ПАВ с напряженностью поля вплоть до 400 В/см не вызывает возгорания экситонной ФЛ.

Возрастание интенсивности ФЛ зона-акцептор при приложении импульса ПАВ свидетельствует об увеличении концентрации электронов в зоне проводимости за счет частичной ионизации ловушек, захватывающих электроны. К ионизации ловушек приводит повышение вероятности эмиссии электронов в зону проводимости под действием электрического поля ПАВ. После выключения ПАВ вероятность эмиссии принимает прежнее значение, что снова приводит к установлению режима длительного затухания. Такое поведение кривых затухания переходов зона-акцептор соответствует пред-

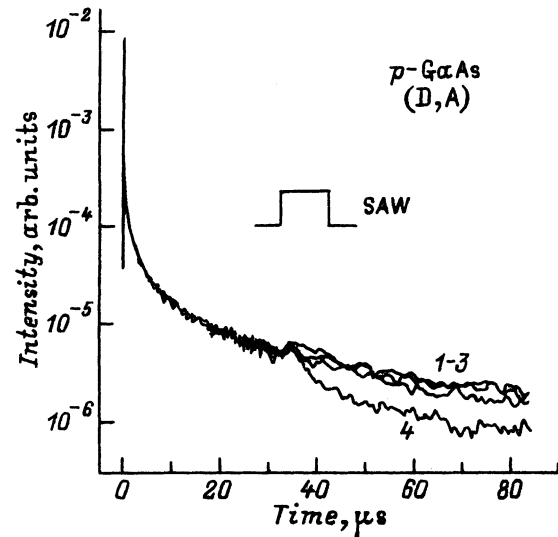


Рис. 3. Кривые затухания интенсивности переходов донор-акцептор (D, A) при приложении поверхностной акустической волны (ПАВ). Напряженность электрического поля ПАВ, В/см: 1 — 0, 2 — 10, 3 — 30, 4 — 100.

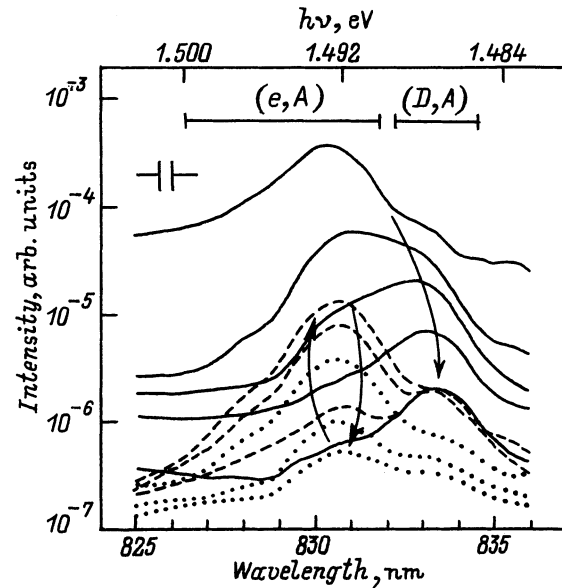


Рис. 4. Эволюция спектра нестационарной фотолюминесценции мелких акцепторов со временем после возбуждения при приложении импульса поверхностной акустической волны (ПАВ) длительностью 10 мкс, задержанного на 23 мкс относительно лазерного импульса. Амплитуда электрического поля ПАВ 50 В/см. Спектры, измеренные до начала импульса ПАВ, показаны сплошными линиями (времена задержки, сверху вниз, мкс: 0,4, 0,8, 1,5, 5 и 21); в течение импульса ПАВ — штриховыми линиями (времена задержки, снизу вверх, мкс: 24, 26 и 28); после выключения ПАВ — пунктирными линиями (времена задержки, сверху вниз, мкс: 35, 45 и 60). Направление модификации спектров при возрастании времени задержки иллюстрируется стрелками.

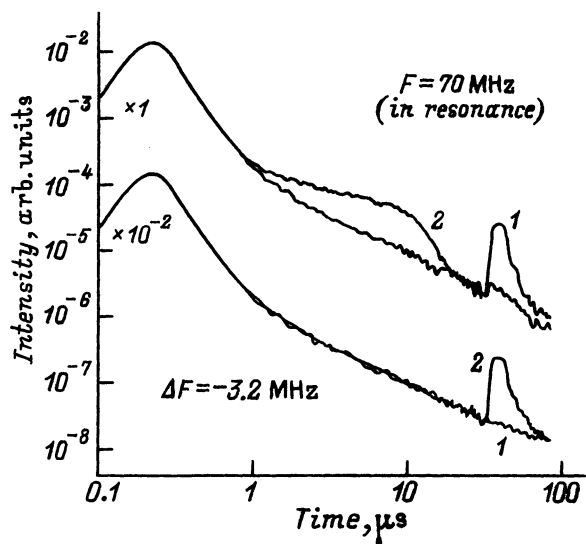


Рис. 5. Кривые затухания переходов зона–акцептор при подаче на встречно-штыревой преобразователь (ВШП) напряжения с частотой, соответствующей максимуму амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) (верхние кривые), и смещенной к минимуму АЧХ (нижние кривые). Напряжение на ВШП U , мВ: 1 — 20, 2 — 200. Для верхних кривых напряженность электрического поля ПАВ равна 40 (кривая 1) и 400 В/см (кривая 2) соответственно.

ложенной модели механизма рекомбинации. При этом затухание ФЛ зона–акцептор в течение импульса ПАВ при напряженности электрического поля свыше 50 В/см может быть обусловлено увеличением количества электронов, транспортируемых из точки фотогенерации движущейся потенциальной решеткой, созданной бегущей поверхностной акустической волной [17].

Перейдем теперь к рассмотрению поведения кривых затухания интенсивности переходов донор–акцептор при приложении ПАВ и покажем, что оно также находится в согласии с рассматриваемой моделью. В соответствии с моделью, для наличия эффекта длительного затухания заполнение ловушек электронами должно быть близко к 100%, а концентрация свободных электронов к моменту приложения ПАВ много меньше концентрации электронов, захваченных на ловушки, и составлять $\sim 0.1\%$ от их количества. Предположим теперь, что в роли ловушек выступают мелкие доноры. Тогда ионизация при приложении ПАВ малой части доноров, порядка 1% от их концентрации, вызовет повышение интенсивности переходов зона–акцептор в несколько раз. При этом малое изменение концентрации электронов, захваченных на доноры, не приведет к заметному уменьшению интенсивности переходов донор–акцептор, что и наблюдается на рис. 3.

Отсутствие возгорания экситонной ФЛ под действием ПАВ указывает на то, что ионизация мелких акцепторов ($E_A \approx 30$ мэВ) не происходит. Это означает, что глубина залегания ловушек, обуславливающих длительное затухание

ФЛ зона–акцептор, значительно меньше глубины залегания мелких акцепторов, что также согласуется с предположением о том, что в роли данных ловушек выступают мелкие доноры ($E_D \approx 6$ мэВ). Можно заключить, таким образом, что длительное затухание ФЛ обусловлено многократным захватом электронов из зоны проводимости на мелкие доноры.

Следует отметить, что модификация кривых затухания ФЛ при приложении ПАВ могла бы также быть вызвана выделением тепла на ВШП, приводящим к повышению температуры образца. Для определения диапазона амплитуд ПАВ, при которых нагрев ВШП не приводит к изменению кривых затухания ФЛ, было проведено дополнительное исследование кинетики ФЛ при приложении к ВШП напряжения с частотой вблизи минимума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователя. При этом напряженность электрического поля ПАВ значительно уменьшалась, а выделение тепла на ВШП оставалось практически постоянным. На рис. 5 приведены результаты измерений кинетики переходов зона–акцептор при подаче на ВШП резонансного и вне-резонансного возбуждающего напряжения амплитудой $U = 20$ и 200 мВ, что в максимуме АЧХ соответствует напряженности электрического поля ПАВ 40 и 400 В/см. Как видно из рисунка, смещение частоты к минимуму АЧХ преобразователя при $U = 20$ мВ приводит к тому, что эффект ионизации доноров исчезает, а кривая затухания ФЛ совпадает с кривой в отсутствие ПАВ. Таким образом, можно заключить, что нагрев ВШП не оказывает влияния на кинетику ФЛ при напряженности электрического поля ПАВ менее 40 В/см. При повышении напряжения на ВШП до 200 мВ в максимуме АЧХ (напряженность электрического поля ПАВ 400 В/см) на кривой затухания при временах задержки 1–20 мкс, т. е. до приложения импульса ПАВ, наблюдается увеличение интенсивности ФЛ и ”перегиб”, после которого затухание ускоряется. Аналогичное поведение кривых затухания ранее наблюдалось нами при повышении температуры образца [6]. В нашем случае, однако, при больших временах задержки вновь наблюдается длительное затухание ФЛ, отсутствующее при измерении в условиях повышенной температуры решетки. При смещении частоты к минимуму АЧХ перегиб кривой исчезает, и остается только эффект ионизации доноров при приложении ПАВ, соответствующий по амплитуде напряженности электрического поля ПАВ ~ 40 В/см. Поскольку длительное затухание ФЛ при повышенной температуре решетки не наблюдается, можно предположить, что перегиб в начале кривой затухания при напряженности электрического поля ПАВ 400 В/см вызван не тепловыделением на ВШП во время импульса, а кратковременным повышением температуры решетки из-за нагрева электронного газа. Этот нагрев обусловлен взаимодействием плотного газа носителей, генерируемого лазерным импульсом, с акустической волной, находящейся в течение длительного времени в резонаторе, образованном ВШП и торцом кристалла ниобата лития.

Заключение

Таким образом, в данной работе было впервые исследовано влияние электрического поля поверхностной акустической волны на кинетику краевой ФЛ в GaAs. Обнаружено, что при подаче импульсов ПАВ с напряженностью электрического поля более 10 В/см интенсивность переходов (зона проводимости)–акцептор возрастает, в то время как кинетика затухания переходов донор–акцептор существенно не изменяется при напряженности поля до 50 В/см. При напряженности поля вплоть до максимальной использованной в 400 В/см возгорание экситонной ФЛ под действием ПАВ не наблюдается. Описанное поведение кинетики краевой ФЛ свидетельствует об ионизации мелких доноров под действием электрического поля ПАВ и подтверждает предложенную модель механизма рекомбинации в чистом GaAs, объясняющую длительное затухание ФЛ мелких акцепторов влиянием многократного захвата свободных электронов мелкими донорами. Показано, что эффект ионизации доноров в электрическом поле определяет вид кинетики ФЛ при напряженности электрического поля ПАВ до ~ 100 В/см, а при большей напряженности значительным становится влияние разогрева электронного газа.

Авторы благодарны А.И. Торопову (ИФП СО РАН) за предоставление образцов эпитаксиального GaAs и И.Л. Дричко (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург) за ознакомление с методической стороной работы [15].

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 98-17896).

Список литературы

- [1] D. Bimberg, H. Munzel, A. Steckenborn, J. Christen. *Phys. Rev. B*, **31**, 7788 (1985).
- [2] Я.Ю. Аавиксоо, И.Я. Рейманд, В.В. Россин, В.В. Травников. *Письма ЖЭТФ*, **53** (7), 377 (1991).
- [3] Д.З. Гарбузов, В.Б. Халфин, М.К. Трукан, В.Г. Агафонов, А. Абдуллаев. *ФТП*, **12**, 1368 (1978).
- [4] R. Dingle. *Phys. Rev.*, **184**, 788 (1969).
- [5] А.М. Gilinsky, K.S. Zhuravlev. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 373 (1996).
- [6] К.С. Журавлев, А.М. Гилинский. *Письма ЖЭТФ*, **65** (1), 81 (1997).
- [7] А.М. Гилинский, К.С. Журавлев, Т.С. Шамирзаев, Н.Т. Мошегов, А.И. Торопов. *Тез. докл. 3-й Росс. конф. по физике полупроводников* (М., 1997) с. 207.
- [8] А.М. Gilinsky, K.S. Zhuravlev. *Collected Abstracts of the International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter* (Osaka, Japan, Aug. 23–27, 1999) p. 172.
- [9] А.М. Гилинский, К.С. Журавлев. *Тез. докл. 4-й Росс. конф. по физике полупроводников* (Новосибирск, 1999) с. 102.
- [10] Э.И. Адирович. *Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов* (М., Гос. изд-во / Техн.-теорет. лит., 1956).

- [11] В.В. Антонов-Рамановский. *Кинетика фотолуминесценции кристаллофосфоров* (М., Наука, 1966).
- [12] G.M. Martin, A. Mittonneau, A. Mircea. *Electron. Lett.*, **13**, 191 (1977).
- [13] K.S. Zhuravlev, D.V. Petrov, Yu.B. Bolkhovityanov, N.S. Rudaja. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3389 (1997).
- [14] C. Rocke, A.O. Govorov, A. Wixforth, G. Bohm, G. Weimann. *Phys. Rev. B*, **57**, 6850 (1998).
- [15] Ю.М. Гальперин, И.Л. Дричко, А.М. Дьяконов, Д.А. Пристинский, И.Ю. Смирнов, А.И. Торопов. *Тез. докл. 4-й Росс. конф. по физике полупроводников* (Новосибирск, 1999) с. 109.
- [16] A. Wixforth, J. Scriba, M. Wassermeier, J.P. Kotthaus, G. Weimann, W. Schlapp. *Phys. Rev. B*, **40**, 7874 (1989).
- [17] C. Rocke, S. Zimmermann, A. Wixforth, J.P. Kotthaus, G. Bohm. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 4099 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of a surface acoustic wave on kinetics of GaAs photoluminescence

K.S. Zhuravlev, A.M. Gilinsky, A.V. Tsarev, A.E. Nickolaenko

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract An experimental investigation of kinetics of low-temperature photoluminescence of undoped GaAs under the influence of the electric field of a surface acoustic wave has been carried out. It is shown that the application of a surface acoustic wave pulse with a field amplitude up to ~ 50 V/cm, delayed by 20–30 μ s with respect to the laser excitation pulse, results in a considerable (10–20 times) increase of the band-to-acceptor transition intensity, while the intensity of the donor-to-acceptor transitions changes only slightly and no excitonic luminescence build-up is observed. The experimental data evidenced the ionization of shallow donors under the influence of the electric field of the surface acoustic wave, and confirmed the model of the recombinations mechanism that we had proposed to explain the long nonexponential decay behavior of free-electron luminescence peculiar to pure GaAs. The model in question considers multiply repeated trappings and detrapings of free electrons by shallow donors as the reason for occurrence of long decays.