

ПОДВИЖНАЯ ЛИНИЯ АКЦЕПТОРНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ "ЧИСТОГО" GaAs

К.С.Журавлев¹⁾, А.М.Гилинский

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 3 декабря 1996 г.

В спектрах фотолюминесценции эпитаксиальных слоев нелегированного GaAs, зарегистрированных с задержкой относительно импульса возбуждения, в области переходов зона – акцептор обнаружена новая линия, существенно (до 15–18 мэВ) смещающаяся в длинноволновую сторону со временем после импульса возбуждения. Характеристики линии свидетельствуют о возможности образования в нелегированном GaAs локальных областей малого объема, имеющих высокий уровень легирования и протяженные хвосты плотности состояний.

PACS: 71.55.-i, 73.50.Gr, 78.55.Cr

Спектроскопия низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) широко используется для контроля примесного и дефектного состава арсенида галлия и близких соединений A_3B_5 . Известно, что в спектрах краевой ФЛ GaAs при низких температурах наблюдаются линии экситонных переходов и переходов на уровни мелких акцепторов, химических или связанных с точечными дефектами материала [1,2]. В отличие от этого, в данной работе мы сообщаем об обнаружении в спектрах низкотемпературной ФЛ нелегированного эпитаксиального арсенида галлия необычной "подвижной" линии, энергетическое положение которой существенно изменяется при изменении интенсивности возбуждения либо со временем после окончания импульсного возбуждения (до 15–18 мэВ за 50–100 мкс). Линия располагается в области переходов с участием мелких акцепторов, доминирует в задержанных спектрах нестационарной ФЛ и не связана с рекомбинацией через мелкие примеси. Наблюдаемые энергетические характеристики линии и ее поведение со временем после возбуждения свидетельствуют о возможности образования в нелегированном GaAs локальных областей малого объема, имеющих высокий уровень легирования и протяженные хвосты плотности состояний.

Исследовались образцы намеренно нелегированного GaAs *n*- и *p*-типов проводимости с концентрацией остаточных мелких примесей N_A , N_D в диапазоне $10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и различной степенью компенсации, полученные методами жидкофазной (ЖФЭ) и молекулярно-лучевой (МЛЭ) эпитаксии в различных ростовых режимах. Образцы выращивались на подложках нелегированного либо легированного хромом полуизолирующего (100) GaAs, толщина эпитаксиальных слоев составляла от 1 до 7 мкм для образцов, полученных МЛЭ, и от 10 до 25 мкм для образцов, полученных ЖФЭ. Для наблюдения линии на фоне примесной люминесценции был применен метод измерения, основанный на регистрации эволюции спектра нестационарной ФЛ после импульсного возбуждения с задержкой в десятки микросекунд. Как было показано в [3],

¹⁾e-mail: L37@isph.t.nsk.su

уменьшение энергетической ширины линий, наблюдаемое в задержанных спектрах, значительно облегчает выделение составляющих и обеспечивает идентификацию переходов в многокомпонентных спектрах примесной ФЛ GaAs. Нестационарная фотолюминесценция возбуждалась импульсными лазерами на ИАГ:Nd (длина волны $\lambda_{exc} = 532$ нм, длительность импульса $\tau = 120$ нс) либо на $Al_2O_3:Ti$ ($\lambda_{exc} = 760$ нм, $\tau = 30$ нс), импульсная плотность мощности возбуждения составляла $0,5-5$ кВт/см². Для возбуждения стационарной ФЛ использовались лазеры на Ag^+ и He-Ne. Регистрация ФЛ производилась спектрометром на основе двойного дифракционного монохроматора и фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов с разрешением по времени.

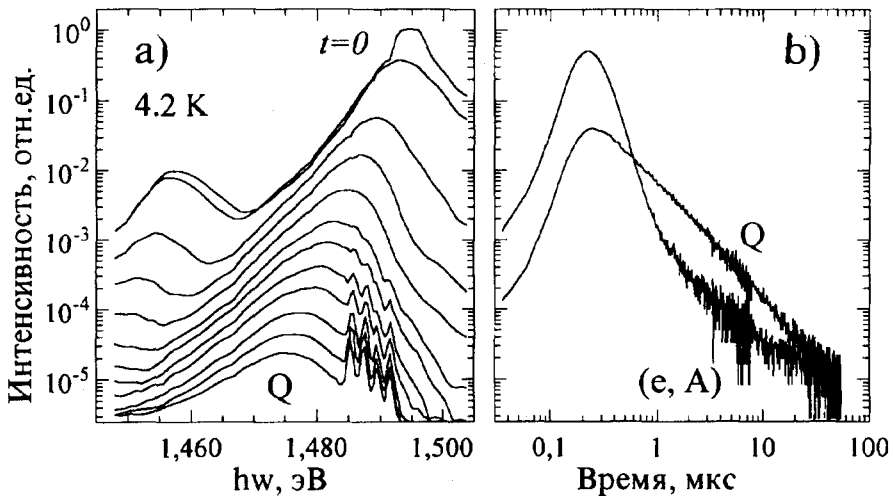


Рис.1. Эволюция спектра ФЛ со временем задержки (а) и кривые затухания нестационарной ФЛ (б) образца, демонстрирующего подвижную линию Q, при температуре $T = 4,2$ К. Спектры (а) зарегистрированы спустя 0, 0,1, 0,3, 0,6, 1, 2, 3,5, 6, 9, 18, 30 и 50 мкс после импульса возбуждения (сверху вниз). Кривые затухания (б) соответствуют $h\omega = 1,4915$ эВ (линия (е, А)) и $h\omega = 1,483$ эВ (линия Q)

На рис.1 показаны спектры и кривые затухания ФЛ образца, демонстрирующего необычную линию ФЛ, при температуре $T = 4,2$ К. Приведенные данные получены на образце *p*-типа проводимости высокой степени чистоты, выращенном методом ЖФЭ из расплава висмута [4] и имевшего по данным холловских измерений $N_A - N_D = 6 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Во время действия импульсной накачки в спектре присутствуют широкая линия с максимумом вблизи 1,493 эВ, связанная с переходами зона - акцептор, и ее фонное повторение. По мере релаксации возбуждения с течением времени обе линии смещаются в длинноволновую сторону. Спустя 3,5 мкс в спектре проявляется тонкая структура, а через 5 мкс после возбуждающего импульса в спектре выделяются четыре узкие линии. Впоследствии две коротковолновые линии не изменяют своего энергетического положения ($h\omega = 1,4913$ и $1,4890$ эВ), а две другие с течением времени смещаются в длинноволновую сторону на ≈ 1 мэВ. Такое поведение свидетельствует о том, что первые две линии обусловлены переходами зона - акцептор (е, А), а вторые - переходами донор - акцептор (D, А) с участием акцепторов магния (либо бериллия) и цинка. Одновременно с

проявлением переходов на мелкие акцепторы в спектре выделяется широкая бесструктурная линия, обозначенная Q , смещающаяся за 50 мкс после возбуждения к $hw = 1,473$ эВ. Форма этой линии существенно отличается от формы линий, связанных с мелкими примесями, и представляет собой асимметричный колокол с экспоненциальными крыльями вида $I(hw) \sim \exp(-|hw - hw_m|/\Delta)$, где hw_m – положение максимума линии. Ширина линии на полувысоте возрастает со временем задержки до 13 мЭВ, а показатели наклона Δ – до ≈ 15 и 5 мЭВ на длинноволновом и коротковолновом крыльях, соответственно, что свидетельствует об отсутствии квазиравновесия в системе участвующих в рекомбинации носителей [2]. Интегральная интенсивность линии Q в задержанных спектрах в 10–20 раз превосходит интенсивность (e, A) и (D, A) линий. Затухание Q -линии со временем происходит по степенному закону, близкому к $I(t) \sim t^{-1,5}$, а (e, A) - и (D, A) -переходов – по закону $I(t) \sim t^{-1}$ (рис.1,б).

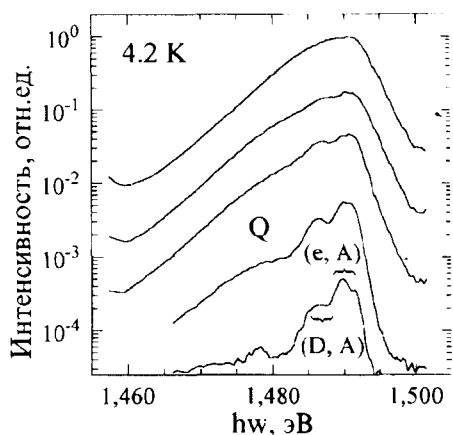


Рис.2. Спектры ФЛ при стационарном возбуждении с плотностью мощности, сверху вниз: 20, 3, 0,4, $6 \cdot 10^{-2}$ и $6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см²; $T = 4.2$ К

При стационарном возбуждении линия Q проявляется слабо. Для сравнения на рис.2 приведены спектры стационарной ФЛ того же образца. Независимо от интенсивности возбуждения в спектрах доминируют (e, A) - и (D, A) -переходы, в то время как линия Q присутствует в виде длинноволнового плеча и явно выделяется только при малых интенсивностях возбуждения, когда достаточно сильно смещается в длинноволновую сторону. При увеличении интенсивности возбуждения наблюдается сверхлинейное возрастание интенсивности линии Q . Зависимость положения ее максимума от интенсивности возбуждения I описывается функцией вида $hw_m(I) = hw_0 + g \cdot \ln(I/I_0)$, где g – параметр, характеризующий смещение линии при изменении интенсивности накачки. Эта же зависимость описывает смещение линии со временем в спектрах нестационарной ФЛ, где при этом I есть интенсивность линии. Значения параметра g для спектров стационарной и нестационарной ФЛ хорошо совпадают и для исследованных образцов составляют $g = 1.5 - 2.5$ мЭВ.

Описанные особенности кинетики затухания и спектров не изменяются при повышении температуры измерения T до $10 \div 12$ К. При дальнейшем увеличении T наблюдается температурное тушение линий (e, A) , (D, A) и Q с одновременным ускорением затухания нестационарной ФЛ. Удивительно, однако, что повышение температуры от 4.2 до 8 К приводит к значительному возрастанию интенсивности переходов на мелкие акцепторы, сопровождающе-

муся равным по величине падением интенсивности линии Q в задержанных спектрах (рис.3). Известно, что в случае однородного легирования материала возрастания интенсивности акцепторных переходов с температурой не наблюдается [1]. Перераспределение интенсивностей линий позволяет заключить, что центры, обуславливающие появление линии Q , конкурируют в процессе захвата неравновесных носителей с мелкими примесями и, следовательно, располагаются на расстоянии менее длины диффузии от последних. Отсюда следует также, что потенциальная яма, в которую захватываются носители, имеет глубину порядка 1 мэВ; при этом ввиду существенно меньшей эффективной массы образование мелкой ямы более вероятно для электронов, чем для дырок.

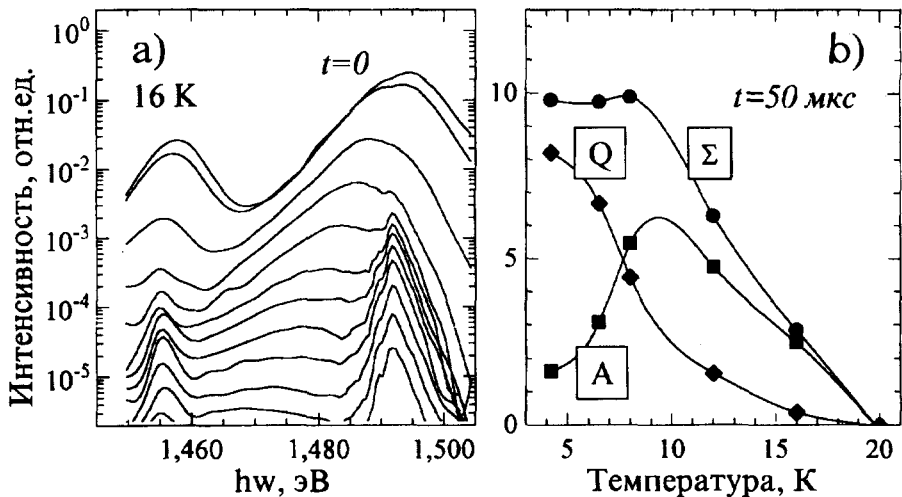


Рис.3. а) Эволюция спектра ФЛ со временем задержки при температуре $T = 16\text{K}$. Спектры зарегистрированы спустя 0, 0.1, 0.3, 0.6, 1, 2, 3.5, 6, 9, 18, 30 и 50 мкс после импульса возбуждения (сверху вниз). б) Температурная зависимость интегральной интенсивности переходов на мелкие акцепторы А, подвижной линии Q и полной интенсивности в спектре Σ через 50 мкс после импульса возбуждения

Линия Q наблюдалась нами в спектрах ряда слоев, полученных методами ЖФЭ и МЛЭ, при этом корреляции наличия линии с концентрацией остаточных примесей либо степенью компенсации слоев обнаружено не было. Измерение профилей концентрации носителей заряда методом С-V также не выявило каких-либо макроскопических неоднородностей, присущих этим образцам. Длительное неэкспоненциальное затухание линии Q свидетельствует о непрямом в пространстве характере рекомбинации носителей. Энергетическое положение, форма линии и ее модификация со временем и сверхлинейная зависимость интенсивности линии от интенсивности накачки позволяют заключить, что линия Q обусловлена переходами между хвостами плотности состояний сильно легированного материала [2]. Аналогичные зависимости наблюдались в образцах сильно компенсированного GaAs и твердых растворах соединений A_3B_5 [5-7] благодаря образованию хвостов плотности состояний глубиной в десятки и сотни миллиэлектронвольт. Оценка глубины хвостов плотности состояний по данным электрофизических параметров слоев, однако,

дает величину, не превышающую единиц миллиэлектронвольт, что не позволяет объяснить большую ширину и смещение линии Q рекомбинацией в хвостах плотности состояний однородного материала. Перекачка интенсивностей линий в спектре при изменении температуры (рис.3) позволяет предположить, что появление линии Q обусловлено существованием в эпитаксиальной пленке локальных областей с высоким уровнем легирования, имеющих большую глубину хвостов плотности состояний и служащих эффективными стоками для неравновесных носителей заряда, но слабо влияющих на электрофизические параметры образцов ввиду малости их объема. Мы полагаем, что формирование таких локально-неоднородных областей возможно в результате проникновения в эпитаксиальные слои примесей или дефектов из подложек.

Авторы благодарны Н.А.Якушевой, Н.С.Рудой, Ю.Б.Болховитянову, Д.И.Лубышеву, Н.Т.Мошегову, А.И.Торопову за предоставление образцов GaAs и В.А.Самойлову за проведение С-V-измерений. Работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 95-02-04755-а.

-
1. E.W.Williams, H. Barry Bebb, в кн. *Semiconductors and Semimetals* 8, Academic Press, New York, 1972, p.321.
 2. А.П.Леванюк, В.В.Осипов, УФН **133**, 427 (1981).
 3. A.M.Gilinsky and K.S.Zhuravlev, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 373 (1996).
 4. Н.С.Рудая, Ю.Б.Болховитянов, К.С.Журавлев и др., *Письма в ЖТФ* **16**, 37 (1990).
 5. D.Redfield, J.P.Wittke, and J.I.Pankove, *Phys. Rev. B* **2**, 1830 (1972).
 6. M.C.DeLong, P.C.Taylor, and J.M.Olson, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 620 (1990).
 7. P.W.Yu, C.E.Stutz, M.O.Manasreh et al., *J. Appl. Phys.* **76**, 504 (1994).