

06;07

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ
СПЕКТРА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ
С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ**

© *О.А.Рябушкин, В.А.Сабликов*

При локальном оптическом воздействии на одиночный гетеропереход GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом фотолюминесценция (PL) и фотоотражение (PR) обнаруживаются на значительном расстоянии от луча накачки, причем с изменением расстояния наблюдается кардинальная перестройка спектра PL . В центре пятна фотовозбуждения излучательная рекомбинация свободных электронов и дырок (e, h) преобладает над рекомбинацией свободных электронов и дырок, связанных на акцепторах (e, A^0), однако при удалении от возбуждающего луча наблюдается изменение соотношения интенсивностей этих процессов, а именно интенсивность излучательной рекомбинации перехода e, A^0 уменьшается значительно медленнее, чем интенсивность перехода e, h . В то же время спектр PR изменяется незначительно.

Исследования фотолюминесценции и фотоотражения в полупроводниках с пространственным квантованием носителей заряда важны не только при решении фундаментальных физических задач, таких как: определение зонной структуры гетеропереходов и спектра электронов в квантовых ямах, механизмов рекомбинации и образования экситонов, но и в прикладных целях при разработке эффективных лазерных источников и чувствительных приемников излучения. Кроме того, PL и PR — надежные методы определения качества гетероструктур с двумерным электронным газом ($2DEG$), являющимся основой современных быстродействующих транзисторов и фототранзисторов.

В работе исследовались одиночные гетеропереходы GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x = 0.3$) с $2DEG$, выращенные по "МВЕ" технологии. Локальное фотовозбуждение осуществлялось He-Ne-лазером ($\lambda = 633$ нм), свет от которого подводился к гетеропереходу с помощью световедущего волокна (СВ1), расположенного в плоскости XZ под углом ($\sim 45^\circ$) к поверхности структуры и жестко с ней связанного (рис. 1, а).

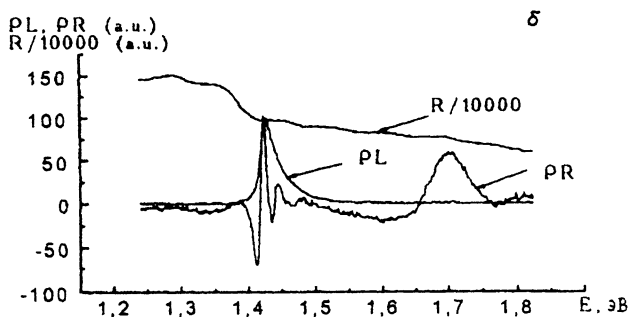
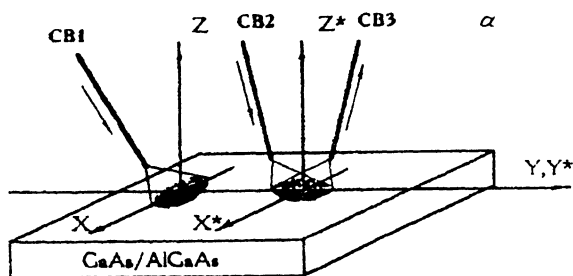


Рис. 1. а — пространственное расположение образца и световедущих волокон; пятно накачки формируется волокном СВ1, жестко связанным с образцом; образец перемещается вдоль Y^* относительно зондирующего пятна, формируемого волокнами СВ2 и СВ3. б — спектры PL , PR и R (масштаб для сигнала отражения уменьшен в 10^4 раза) в точке $Y = 0$, для которой центры зондирующего луча и пятна накачки совпадают.

Диаметр светового пятна на поверхности структуры составлял $\sim (80-100)$ мкм. Гетероструктура и СВ1 с помощью однокоординатного сканера могли перемещаться вдоль Y^* относительно фиксированных в пространстве и расположенных в плоскости Z^*Y^* волокон СВ2 и СВ3, используемых для регистрации PL и PR . Интенсивность возбуждения изменялась с помощью нейтральных фильтров от 1 мВт/см² до 1 Вт/см². Отражение (R) и фотоотражение исследовались с помощью зондирующего света, направляемого волокном СВ2 от осветительной лампы после фильтрации стеклян-

ными фильтрами. Отраженный свет и рекомбинационное излучение принимались волокном СВЗ (СВ2 и СВ3 расположены под углом $\sim \pm 30^\circ$ к оси Z^*) и исследовались в спектральном диапазоне собственного поглощения как GaAs, так и GaAlAs. Запись и предварительная обработка спектров R , PR и PL проводились на автоматизированном стенде, в основе которого был монохроматор с отражательной решеткой 600 штр/мм (спектральное разрешение ~ 2 мэВ). Интенсивности зондирующего света и фотовозбуждения тщательно контролировались при записи спектров и учитывались при обработке результатов. При комнатной температуре сигналы PL и PR сравнимы по величине и составляют $\sim 10^{-4}$ от интенсивности отраженного сигнала (интенсивность зондирующего света ~ 10 мкВт/см², а интенсивность фотовозбуждения ~ 1 Вт/см²). Они легко разделяются с помощью аппаратных и программных средств. Выделенные в отдельные спектры R , PL и PR приведены на рис. 1, б.

В литературе до сих пор обсуждается проблема интерпертации спектра PR от одиночной гетероструктуры с $2DEG$. Характерные осцилляции в спектре PR в области собственного поглощения GaAs не позволяют однозначно определить область, детально характеризующую спектр $2DEG$. Тем не менее форма линии этих осцилляций указывает на хорошее качество гетероструктуры и наличие $2DEG$. Особенность спектра PL состоит в том, что высокочастотное "крыло" линии, представленное в полулогарифмическом масштабе по энергии, позволяет определять температуру $2DEG$, а спектральный максимум — температуру решетки. При сканировании от центра пятна фотовозбуждения нами установлено, что температура $2DEG$ не отличается от температуры решетки при выбранных нами уровнях фотовозбуждения в используемом диапазоне температур 300–77 К.

При комнатной температуре было также установлено, что при удалении приемного волокна от пятна фотовозбуждения форма линий R , PL и PR не меняется, а амплитуды сигналов PL и PR уменьшаются в соответствии с пространственным распределением интенсивности накачки.

Иная картина наблюдается при температуре 77 К, при которой PL при пространственном сканировании обнаруживается на расстоянии, значительно превышающем (более чем в 10 раз) характерный размер пятна накачки. Более того, спектр PL , состоящий из двух пиков, находящихся друг от друга на энергетическом расстоянии ~ 30 мэВ (30 мэВ — характерная энергия ионизации акцепторных примесей (С, Ве, Mg, Zn, Si) в GaAs) кардинально изменяется. Если в

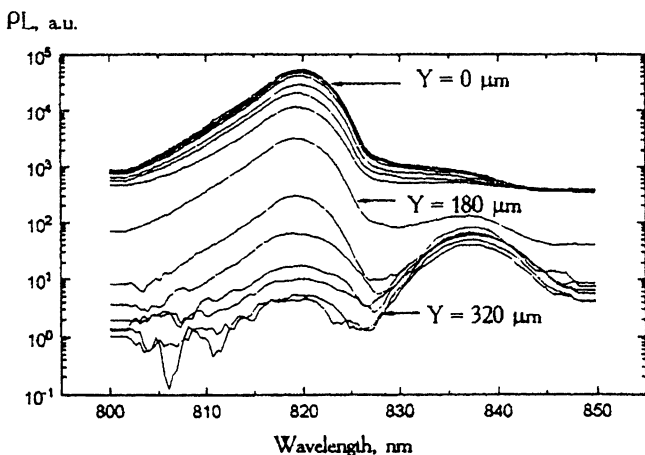


Рис. 2. Изменение спектра PL при пространственном сканировании от пятна фотовозбуждения, при $Y = 0$ центры лучей зондирования и возбуждения совпадают. Температура решетки и ДЭГ равна 77 К.

центре пятна возбуждения высокочастотный пик $A1$, который мы связываем с излучательной рекомбинацией свободных электронов $2DEG$ со свободными дырками, значительно превосходит по амплитуде низкочастотный пик $A2$, обусловленный рекомбинацией со связанными на акцепторах дырками (рис. 2), то на расстоянии ~ 300 мкм от центра луча фотовозбуждения пик $A2$ значительно превосходит по величине пик $A1$.

Здесь необходимо подчеркнуть, что при понижении температуры (ниже ~ 100 К) и при сохраняемых уровнях возбуждения и зондирования сигнал PL возрастает \sim в 10^3 раз по сравнению с сигналом PR . При исследовании PR в диапазоне собственного поглощения $GaAs$ сигнал PL полностью "забивает" сигнал PR и проследить за его изменениями при сканировании нет возможности. В то же время спектр PR (регистрируемый в энергетическом диапазоне собственного поглощения $GaAlAs$) изменяется только по амплитуде в соответствии с пространственным распределением фотовозбуждения.

На рис. 3 приведены зависимости изменения интенсивности PL спектральных максимумов $A1$ ($\lambda_1 = 819$ нм) и $A2$ ($\lambda_2 = 837$ нм), из которых видно, что пространственные изменения рекомбинационных процессов (e, h) и (eA^0) совершенно различны. Более того, пик $A2$ регистрируется на расстояниях, превышающих ~ 0.5 мм, в то время как размер пятна фотовозбуждения остается ~ 80 мкм. PL , соот-

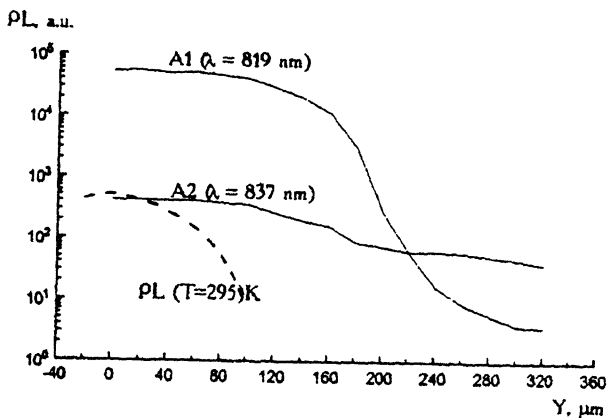


Рис. 3. Изменение амплитуды спектральных максимумов PL на длине волны $\lambda_1 = 819$ нм (A1) и $\lambda_2 = 837$ нм (A2) при увеличении расстояния от центра луча возбуждения до центра луча зондирования. Пунктирная кривая — изменение интенсивности PL при комнатной температуре.

ветствующая пику A1, “теряется” в шумах уже на расстояниях ~ 350 мкм.

Качественное объяснение наблюдаемому явлению дается в рамках модели пространственного разделения неравновесных носителей заряда встроенным и фотоиндуцированным электрическими полями в гетероструктурах с $2DEG$ [1–3]. Согласно этой модели расстояние, на которое распространяются неравновесные носители и связанное с ними рекомбинационное излучение, зависит от проводимости $2DEG$, плотности и спектра поверхностных состояний, а также от температуры и может достигать нескольких сантиметров. Необходимо подчеркнуть, что обнаруженный эффект, по всей видимости, аналогичен по своей природе наблюдаемому в работе [4] изменению спектра PR . В то же время в нашем случае спектр PR в области собственного поглощения GaAlAs практически не изменяется, а амплитуда сигнала изменяется в соответствии с изменением амплитуды A1 спектра PL .

Эта работа частично поддержана Международным научным фондом (грант — RL7300), МНТП “Физика твердотельных наноструктур”, МНТП “Оптика. Лазерная физика”.

Список литературы

- [1] *Sablikov V.A., Ryabushkin O.A., Bader V.A.* // 94CLEO/Europe-EQEC. The World-Wide Forum of Lasers and Electro-Optic, Amsterdam, 1994, Abstracts, QFB6.
- [2] *Ryabushkin O.A., Sablikov V.A. et al.* // Abstracts of invited lectures and contributed papers of the International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, 95. St. Petersburg, 1995. P. 52-53.
- [3] *Sablikov V.A., Ryabushkin O.A.* 15-th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (XV-ICONO, 95), Technical Digest. V. 2. St. Petersburg, Russia, 1995.
- [4] *Sydov M., Engholm et al.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. P. 13796.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Фрязино

Поступило в Редакцию
15 января 1996 г.