

05;06;07

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КАК МЕТОД КОНТРОЛЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ GaAs

© И.А.Буйнова, С.С.Остапенко, А.У.Савчук

Институт физики полупроводников АН Украины,
252650 Киев, Украина
(Поступило в Редакцию 17 июня 1994 г.
В окончательной редакции 24 мая 1995 г.)

Предложен оптический метод контроля величины и распределения напряжений в переходных слоях эпитаксиальная пленка-подложка, основанный на измерении зависимости степени спонтанной поляризации ФЛ глубоких центров, расположенных в ЭП, от энергии квантов возбуждающего света. Возможности предложенного метода продемонстрированы на примере гомоэпитаксиальных структур GaAs с различными толщинами эпитаксиального слоя, а также типом и концентрацией легирующей примеси.

Введение

Проблема контроля внутренних напряжений, возникающих на границе эпитаксиальная пленка (ЭП)-подложка, актуальна для получения структур с заданными свойствами. Одной из основных причин возникновения напряжений в гомозонных структурах являются различие периодов решетки ЭП и подложки в результате из различного легирования. Рассогласование параметров решетки приводит к формированию области упругих напряжений, частичная релаксация которых происходит в результате образования дислокаций несоответствия.

Для контроля упругих напряжений в эпитаксиальных структурах обычно используются поляризационно-оптические [1-6] и рентгеновские методики [4]. Физической основой известных оптических методов является изменение зонной структуры кристалла под действием деформации, возникающей на границе эпитаксиального слоя. Это приводит как к сдвигу положения максимума зона-зонной фотолюминесценции (ФЛ) [6], так и к изменению ее поляризации [1-4].

В то же время известно, что деформация решетки существенно влияет также на люминесцентные характеристики глубоких центров свечения. Под действием анизотропных напряжений происходит снятие

их ориентационного вырождения в кристалле, что приводит к расщеплению линий связанных экситонов [7], а также поляризации широких полос ФЛ, обусловленных излучательной рекомбинацией с участием глубоких комплексных центров свечения [8,9]. Поэтому естественно предположить, что анизотропные центры люминесценции в GaAs могут быть использованы в качестве своего рода "зондов" для исследования различного рода напряжений в кристалле и, в частности, в переходной области ЭП-подложка. Изменяя длину волны возбуждающего света и, следовательно, глубину его проникновения, можно дополнительно исследовать профили распределения напряжений по толщине структур.

В данной работе предложен оптический метод контроля величины и распределения напряжений в переходных слоях ЭП-подложка, основанный на измерении зависимости спонтанной поляризации ФЛ (P_{sp}) глубоких центров, расположенных в ЭП, от энергии квантов возбуждающего света.

Методика эксперимента

Исследовались автоэпитаксиальные структуры на основе GaAs. Эпитаксиальные пленки выращивались в хлоридной газотранспортной системе и легировались донорными примесями S и Sn до концентраций свободных носителей $n = 10^{15} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина пленок изменялась в пределах 3-100 мкм. В качестве подложки применялся полуизолирующий GaAs. При выращивании пленок использовалась (100) ориентация подложки. Параметры исследованных образцов приведены в таблице.

Исследования спектров фотолюминесценции и спектров ее возбуждения (СВЛ) проводились на автоматизированном спектральном комплексе СДЛ-2. Источником возбуждения служила лампа КГМ-12 с монохроматором МДР-12. Регистрация осуществлялась в режиме счета фотонов на спектрометре МДР-23 с охлаждаемым ФЭУ-62. Все измерения проводились при $T = 77 \text{ К}$. Измерения проводились в ортогональной схеме регистрации ФЛ, причем направление возбуждающего света совпадало с нормалью к пленке. Степень спонтанной поляризации определялась соотношением

$$P_{sp} = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}},$$

где I_{\parallel} и I_{\perp} — ортогонально поляризованные по отношению к направлению (100) компоненты интенсивности полосы ФЛ при ее неполяризованном возбуждении.

Параметры исследованных эпитаксиальных структур

Номер образца	Толщина эпитаксиального слоя, мкм	Концентрация свободных носителей, см^{-3}	Легированная примесь
B507 ₁	9.2	$5.5 \cdot 10^{16}$	Sn
B502	9	$1.3 \cdot 10^{16}$	"
B961 ₂	10	$4.0 \cdot 10^{15}$	"
1003	10	$3.5 \cdot 10^{18}$	"
623 ₂	105	$2.5 \cdot 10^{17}$	S

Спектры ФЛ исследованных эпитаксиальных слоев GaAs содержат известные полосы с максимумами вблизи 1.30, 1.22 и 1.03 эВ. Соотношение интенсивностей этих полос изменяется с ростом концентрации легирующей примеси в соответствии с известными данными [9]. На рис. 1,а приведены характерные СВЛ различных полос свечения для образца В507₁. Как видно, форма СВЛ значительно отличается для разных полос ФЛ, что, вероятно, является следствием неоднородного распределения данных центров по толщине ЭП.

Проведенные измерения спонтанной поляризации показали, что свечение линейно поляризовано при возбуждении в примесной области ($h\nu_{ex} < E_g$), в то время как в области собственного поглощения поляризация ФЛ незначительна. Спектральная зависимость $P_{sp}(h\nu_{ex})$ для разных полос свечения приведена на рис. 1,б. Данная зависимость лучше всего проявляется для полос ФЛ 1.22 и 1.03 эВ. Как будет показано ниже, характер зависимости $P_{sp}(h\nu_{ex})$ определяется как толщиной ЭП, так и типом и концентрацией легирующей примеси (рис. 1,2). С увеличением толщины ЭП рост степени спонтанной поляризации начинается при больших значениях энергии возбуждения. Это наглядно продемонстрировано на модельных структурах, на которых было проведено "ступенчатое", т.е. послойное, травление ЭП толщиной 105 мкм с шагом ~ 20 мкм (рис. 2,а).

Влияние природы легирующей примеси на спектральные зависимости $P_{sp}(h\nu_{ex})$ продемонстрировано на примере образцов 623₂, В507, 961₂ и В502, легированных Sn и S (рис. 1 и 2). Видно, что при легировании примесью S, имеющей меньший тетраэдрический радиус, чем As, спонтанная поляризация полосы 1.03 эВ отрицательна. В то же время наблюдаемая P_{sp} этой же полосы ФЛ положительна в случае легирования примесью Sn, тетраэдрический радиус которой превышает радиусы основных компонентов решетки.

Для исследования влияния концентрации легирующей примеси на величину упругих напряжений были выбраны образцы примерно одинаковой толщины, концентрация легирующей примеси в которых изменялась от $4 \cdot 10^{15}$ до $3.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Зависимость поляризационных характеристик СВЛ от концентрации легирующей примеси Sn представлена на рис. 2,б. Рост концентрации Sn приводит к значительному росту величины P_{sp} в области $h\nu_{ex} < E_g$. Аналогичные зависимости наблюдались также для эпитаксиальных структур, легированных S.

Обычно считается, что глубокие центры свечения, ответственные за полосы ФЛ GaAs в области 0.9–1.4 эВ, являются сложными анизотропными комплексами, в состав которых входят как собственные дефекты решетки, так и примесные атомы. Механические напряжения в переходной области должны приводить к снятию ориентационного вырождения этих центров и, следовательно, к поляризации ФЛ. Степень этой поляризации зависит не только от величины внутренних напряжений, но и от "жесткости" самого центра ФЛ, т.е. его барического коэффициента, который является важным параметром при выборе "зондирующего" дефекта.

Полученные результаты показывают, что при прочих равных условиях наибольшее значение степени спонтанной поляризации наблюдается для центров свечения 1.22 и 1.03 эВ. Это находится в полном соответствии с предыдущими исследованиями, обнаружившими высокую

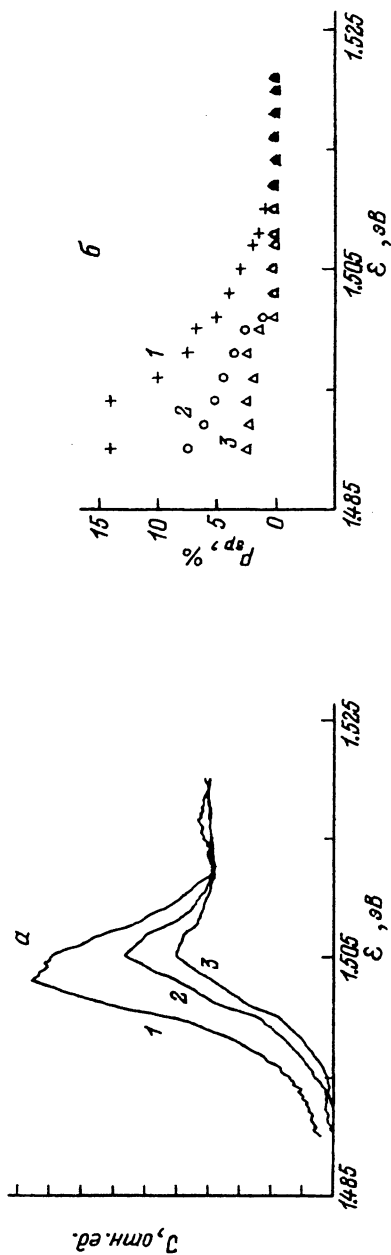


Рис. 1. Спектры возбуждения полос фотолюминесценции 1.03 (1), 1.30 (2), 1.22 эВ (3) для образца В507₁ (а) и спектральная зависимость спонтанной поляризации для полос ФЛ 1.03 (1), 1.30 (3), 1.22 эВ (2) (б).

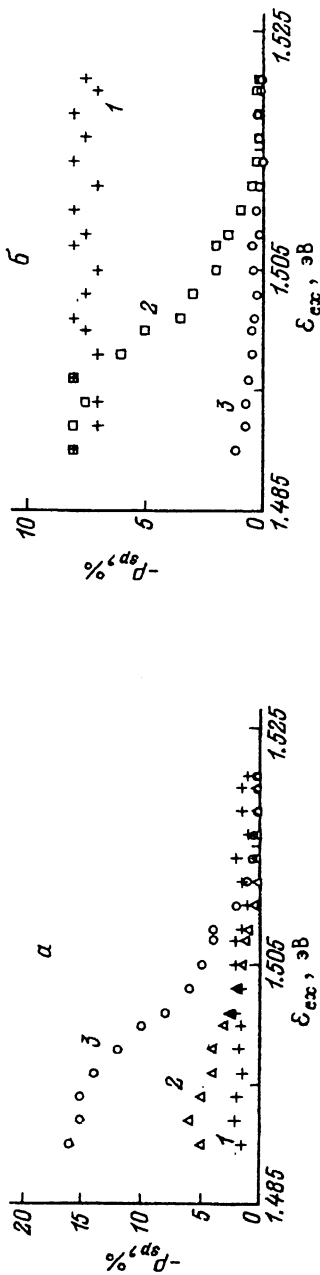


Рис. 2. Спектральная зависимость спонтанной поляризации полосы ФЛ 1.03 эВ.

а — для модельной эпитаксиальной структуры 623₂ различной толщины 5 (1), 25 (2), 105 мкм (3); б — для эпитаксиальных структур с концентрацией леглирующей примеси $4 \cdot 10^{15}$ (1), $1.3 \cdot 10^{16}$ (2), $5.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (3).

чувствительность этих центров к внешним направленным воздействиям: линейно поляризованному свету [7,8] и одноосному сжатию [10,11]. Высокая чувствительность данных центров ФЛ к деформации и обуславливает их выбор в качестве "зондов" для исследования механических напряжений в эпитаксиальных структурах.

Поскольку уменьшение энергии кванта возбуждающего света приводит к увеличению глубины его проникновения в ЭП, то можно предположить, что вклад в ФЛ центров, находящихся на разной глубине эпитаксиального слоя, можно варьировать изменяя $h\nu_{ex}$. При зона-зонном возбуждении ($h\nu_{ex} > 1.5 \text{ эВ}$) вклад в люминесценцию дают центры, расположенные вблизи поверхности (для GaAs с учетом диффузионной длины эта величина составляет несколько мкм). Следовательно, при толщине пленки порядка нескольких десятков мкм переходная область должна принимать незначительное участие в формировании спектра. В области прикраевого возбуждения ($h\nu_{ex} > 1.5 \text{ эВ}$) вклад в люминесценцию дают все центры, в том числе и в напряженной переходной области. Это, как мы считаем, и обуславливает наблюдаемую зависимость величины спонтанной поляризации от энергии кванта возбуждающего света. Таким образом, зависимость $P_{sp}(h\nu_{ex})$ отражает профиль распределения упругих напряжений по глубине эпитаксиального слоя.

Вывод об определяющей роли переходной области в формировании спектральной зависимости P_{sp} подтверждается результатами исследований модельных структур, легированных примесью серы, на которых было проведено ступеньчатое травление. Тетраэдрический радиус серы меньше, чем мышьяка, и, таким образом, при замещении атомов As атомами S решетка должна испытывать сжатие. При достаточно малой толщине пленки ($\sim 5 \text{ мкм}$) величина $P_{sp} \sim \text{const}$ (рис. 2, а, кривая 1) независимо от энергии квантов возбуждения, так как, во-первых, вся пленка оказывается напряженной и, во-вторых, глубина проникновения фотовозбужденных носителей даже при зона-зонном возбуждении становится сравнимой с толщиной ЭП. По мере увеличения толщины пленки вклад напряженной переходной области в сигнал ФЛ уменьшается. Это проявляется в уменьшении величины P_{sp} в области собственного поглощения GaAs (рис. 2, а, кривые 2, 3). При толщине пленки 105 мкм $P_{sp} \sim 0$ вплоть до $h\nu_{ex} \sim 1.49 \text{ эВ}$. Существенно, что одновременно с изменением характера зависимости $P_{sp}(h\nu_{ex})$ наблюдалось также смещение положения максимума зона-зонной ФЛ на $\sim 1 \text{ мэВ}$ ($T = 4.2 \text{ К}$) в коротковолновую область при изменении толщины пленки от 105 до 5 мкм . Согласно результатам, полученным в [12,13], такое смещение соответствует относительной деформации решетки $\sim 10^{-5}$. Это указывает на более высокую чувствительность предлагаемой методики по сравнению с известными аналогами [2].

Как указывалось выше, рассмотренные модельные структуры были легированы примесью S, приводящей к сжатию кристаллической решетки. Наблюдаемая при этом спонтанная поляризация полосы ФЛ 1.03 эВ имеет отрицательный знак. Поэтому естественно предположить, что растяжение решетки должно приводить к положительной поляризации указанной полосы свечения. Этот вывод был проверен нами на ЭП, легированных примесью Sn с тетраэдрическим радиусом, превышающим радиусы основных компонентов. Результаты измерений приведены на рис. 2, б. Видно, что в случае GaAs : Sn величина P_{sp}

положительна, что находится в полном соответствии в приведенным анализом.

Механические напряжения σ , возникающие в переходной области, могут быть качественно описаны с помощью выражения, полученного в [14], $\sigma \sim K(N_{\text{пл}} - N_{\text{подл}})$. Здесь $N_{\text{пл}}$ и $N_{\text{подл}}$ — концентрация примеси в пленке и подложке соответственно; K — некий коэффициент, зависящий от модуля упругости, коэффициента Пуассона и типа легирующей примеси. Поскольку в нашем случае подложкой служил полуизолирующий GaAs, то можно предположить, что напряжения в пленке, обусловленные разницей периодов решетки, и, следовательно, поляризация ФЛ должны быть пропорциональны концентрации легирующей примеси.

Для проверки этого утверждения рассмотрим поведение спектральной зависимости P_{sp} на примере наиболее чувствительной к механическим напряжениям полосы 1.03 эВ. При низких концентрациях легирования $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ величина σ мала, спонтанная поляризация отсутствует во всем спектральном диапазоне (кривая 1 на рис. 2,б). По мере увеличения концентрации легирующей примеси величина σ возрастает. Это проявляется в увеличении P_{sp} (кривые 2, 3 на рис. 2,б), причем величина $P_{sp} \sim N$.

Таким образом, предложенный метод позволяет осуществлять качественный контроль наличия и распределения упругих напряжений по толщине эпитаксиальной пленки. При этом по знаку наблюдаемой спонтанной поляризации можно судить о характере внутренних напряжений (растяжение или сжатие), а по степени — о величине. Показана высокая чувствительность данного метода к изменению технологических условий роста пленки (толщина, концентрация и тип легирующей примеси).

Авторы выражают благодарность Л.П. Пороховниченко за любезно предоставленные образцы и полезные замечания в процессе обсуждения работы.

Список литературы

- [1] Инденбом В.Л., Никитенко В.И. Напряжения и дислокации в полупроводниках. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 68 с.
- [2] Берт Н.А., Гореленок А.Т., Дзигасов А.Г. // ФТТ. 1982. Т. 16. Вып. 1. С. 60–67.
- [3] Rich D., Ksendzov A., Terhune R.W. et al. // Phys. Rev. (B). 1991. Vol. 43. N 8. P. 6836–6839.
- [4] Maruyama T., Garvin E.L. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 66. N 18. P. 2376–2379.
- [5] Komins T.J., Meesau E.S. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 34. P. 5064–5071.
- [6] Оборина Е.И., Пороховниченко Л.П. А.с. № 1072680.
- [7] Буянова И.А., Остапенко С.С. // Phys. Stat. Sol. (a). 1987. Vol. 103. N 2. P. K161–K164.
- [8] Буянова И.А., Остапенко С.С., Шейнкман М.К. // ФТТ. 1985. Т. 27. Вып. 3. С. 748–756.
- [9] Оборина Е.И., Пороховниченко Л.П. // Изв. АН СССР. Неорганич. матер. Т. 22. № 1. С. 5–8.
- [10] Аверкиев Т.К., Гудкин А.А. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 3. С. 418–421.
- [11] Barau J., Voilott F. // J. Phys. C. 1981. Vol. 14. N 2. P. 3447–3462.
- [12] Mirlin D.N., Sapega V.F., Karlik I.Ya., Katiluis R. // Sol. St. Comm. 1987. Vol. 61. P. 799–802.
- [13] Wolford D.J., Bradley J.A. // Sol. St. Commun. 1985. Vol. 53. P. 1069–1076.
- [14] Мильевский М.Г., Освенский В.В. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников. М.: Металлургия, 1985. 195 с.