

УДК 535.37

©1994

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДОПОРОГОВОЙ МОЩНОСТИ НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ SiGe

И.А.Буянова, А.У.Савчук, М.К.Шейнхман, А.В.Буянов

Обнаружено влияние ультразвука допороговой мощности на характеристики дислокационной люминесценции эпитаксиальных гетероструктур  $n\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{-}n\text{-Si}$ . Показано, что ультразвуковая обработка (УЗО) приводит к изменению интенсивности  $D_1$  и  $D_2$  линий свечения, а также к уменьшению величины их линейной поляризации. Для объяснения обнаруженного эффекта предлагаются два механизма ультразвуковой обработки: а) стимулированное ультразвуковое геттерирование точечных дефектов дислокацией, б) переориентация расположенных в придислокационной области примесей и дефектов для уменьшения имеющейся в этой области деформации решетки.

В последнее время все бóльшую актуальность приобретает проблема взаимодействия ультразвуковых волн с различными типами дефектов в полупроводниках. С практической точки зрения интерес к этому вопросу связан с принципиальной возможностью контролируемым образом улучшать параметры полупроводниковых материалов и приборов в результате ультразвукового воздействия [1,2]. Научная сторона вопроса связана с высокой эффективностью данного метода при изучении элементарных механизмов диффузии и локальной перестройки дефектов [3,4], в том числе явления метастабильности [5,6].

Установлено, что влияние ультразвука на свойства материала существенно зависит от энергии ультразвуковой волны. При превышении энергии ультразвука некоторого порогового значения в кристалле могут генерироваться новые как точечные [7], так и линейные [8,9] дефекты. С другой стороны, даже сравнительно слабое (допороговое) ультразвуковое воздействие может значительно изменять характеристики кристалла [10-12]. Последний эффект известен также как ультразвуковая обработка (УЗО) материала и был всесторонне исследован нами в [5,10,11].

В качестве одного из возможных механизмов влияния ультразвуковой допороговой мощности на дефектный состав полупроводниковых соединений  $A_2B_6$  и  $A_3B_5$  был предложен так называемый дислокационный механизм, рассмотренный в [13]. Суть данного механизма состоит в создании в придислокационной области переменных электрического и деформационного полей в результате стимулированных ультразвуковых колебаний дислокации. Взаимодействие этих полей с точечными

дефектами и примесями может приводить либо к диффузии (дрейфу) последних к дислокации [10] (ультразвуковое геттерирование точечных дефектов), либо к локальной перестройке центров [5].

Известно [14-17], что так называемые  $D$ -линии фотолюминесценции в материалах Si и SiGe обусловлены излучательной рекомбинацией неравновесных носителей вблизи дислокаций и, следовательно, могут быть использованы для изучения механизма УЗО в указанных материалах. Обнаруженное ранее изменение интенсивности  $D$ -линий фотолюминесценции в эпитаксиальных слоях Si после ультразвуковой обработки, а также рост времени жизни неосновных носителей тока после УЗО [12,18] свидетельствуют в пользу стимулированного ультразвукового геттерирования точечных дефектов дислокациями или преципитатами.

Более полная информация о происходящих в результате УЗО процессах может быть получена из поляризационных исследований, которые позволяют регистрировать изменения не только концентрации центров свечения, но и их пространственной структуры.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования действия ультразвука допороговой мощности на интенсивность и поляризационные характеристики  $D$ -линий фотолюминесценции эпитаксиальных слоев твердых растворов GeSi.

## 1. Методика эксперимента

Исследовались эпитаксиальные гетероструктуры  $n$ -Si- $n$ -Ge $_x$ Si $_{1-x}$  ( $B$ ) с постоянными и переменными профилями распределения Ge по толщине эпитаксиального слоя. Эпитаксиальные слои выращивались методом газофазной эпитаксии. Проводимость слоев составляла 1-2  $\Omega$ -см. Параметры исследованных образцов приведены в таблице. Толщина пленки для всех составов  $x$  превышала критическое значение, что обеспечивало наличие развитой дислокационной сетки. В качестве подложки использовались пластины кремния  $n$ -типа с ориентацией плоскости пластины (100). Исследуемые образцы имели прямоугольную форму и получались в результате раскалывания пластины по плоскостям спайности (011).

Распределение компонентов твердого раствора по толщине эпитаксиального слоя измерялось методом отраженных электронов. Измерения проводились на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У с использованием плоскостных парных детекторов отраженных электронов. Методика измерений подробно изложена в [19].

Ультразвуковые колебания возбуждались в образце с помощью круглого пьезокерамического преобразователя на его основной резонансной частоте  $f \sim 80 \div 100$  kHz, соответствующей радиальной моде. Образец широкой гранью фиксировался на преобразователе. Для обеспечения акустического контакта между образцом и преобразователем использовался глицерин. При измерениях преобразователь с образцом устанавливались внутри оптического криостата так, чтобы обеспечить возможность УЗО образца «in situ», т.е. без изменения положения образца между измерениями фотолюминесценции.

УЗО проводилась при комнатной температуре в течение 1 h. Величина создаваемой переменной деформации составляла  $\epsilon \sim (5 \div 7) \cdot 10^{-6}$ .

Использовались два режима обработки: а) в темноте; б) при одновременном с ультразвуковым освещением образца белым светом (300–700 nm), сфокусированным от ксеноновой лампы ДКСШ-150.

Измерения фотолюминесценции проводились стандартным методом синхронно-фазового детектирования. Люминесценция возбуждалась с помощью лампы ДКСШ-150 и регистрировалась спектрометром ИКС-12 с фотоприемником PbS.

При измерениях поляризации использовалась ортогональная схема регистрации с направлением возбуждения [100] и направлением регистрации [011]. Спонтанная поляризация свечения вычислялась по формуле

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

где  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  — интенсивность фотолюминесценции, прошедшей через анализатор с плоскостью поляризации, параллельной  $I_{\parallel}$  либо перпендикулярной  $I_{\perp}$  направлению [011].

## 2. Экспериментальные результаты

Результаты измерений профилей исследованных эпитаксиальных слоев  $Ge_xSi_{1-x}$  переменного и постоянного состава до и после УЗО представлены на рис. 1.

На рис. 2 приведен спектр фотолюминесценции образца G247/7. Спектр содержит  $D_1$ -,  $D_2$ - и  $D_4$ -линии люминесценции с положением максимумов 0.812, 0.860 и 0.951 eV соответственно. Аналогичные спектры наблюдались для всех исследованных образцов, причем энергетическое положение линий зависело от состава  $x$  в соответствии с данными [20].

УЗО материала приводила к значительному возрастанию интенсивности  $D$ -линий (рис. 2, а). Существенно, что влияние ультразвука наблюдалось только при его комбинированном действии с освещением. Эффективность обработки (т.е. отношение интенсивностей фотолюминесценции до и после УЗО) была максимальной для  $D_1$ -линии

Параметры исследованных гетероструктур  $n-Ge_xSi_{1-x}-n-Si$

Номер образца	Состав $x$ , %	Толщина пленки, $\mu\text{m}$	Состав буферного слоя, $\mu\text{m}$	Толщина буферного слоя, $\mu\text{m}$
G436/8	8	4	—	—
L12/6	11	2	—	—
G247/7	15	20	—	—
G3	15	10	—	—
A10	15	4	—	—
G440/8	22	4	—	—
G138/9	0	2	0 – 11	6.5
G317/8	0	0.5	0 – 10	3
G308/8	0	0.5	0 – 12	3

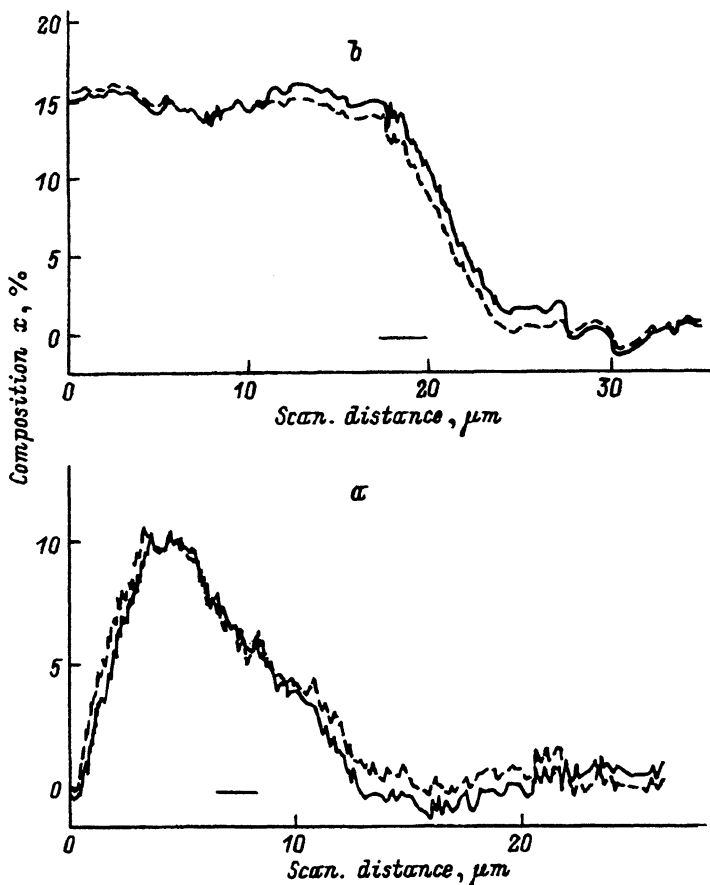


Рис. 1. а) Типичный профиль распределения основных компонентов варизонных гетероструктур до (сплошная линия) и после (пунктир) УЗО. Образец G138/9. б) Типичный профиль распределения основных компонентов гомозонных гетероструктур до (сплошная линия) и после (пунктир) УЗО. Образец G247/7.

(до 1.2), в то время как  $D_4$  фотолюминесценции изменялась незначительно (в 1.06–1.07 раза). После прекращения УЗО в большинстве случаев происходил дальнейший рост фотолюминесценции в течение 1–2 суток. Последующие обработки приводили к дополнительному возрастанию интенсивности свечения, однако величина эффекта уменьшалась для каждого последующего воздействия. После 6–7 обработок наблюдалось полное насыщение сигнала фотолюминесценции (рис. 3, а) на уровне, превышающем для  $D_1$ -линии исходное значение в 1.75 раза. Релаксация полученного состояния кристалла при комнатной температуре не наблюдалась в течение по крайней мере одной недели.

Эффективность обработки монотонно увеличивалась с увеличением переменной деформации  $\epsilon$ , создаваемой в кристалле при прохождении ультразвуковой волны. Эффект обработки достоверно регистрировался при  $\epsilon > 5 \cdot 10^{-7}$ .

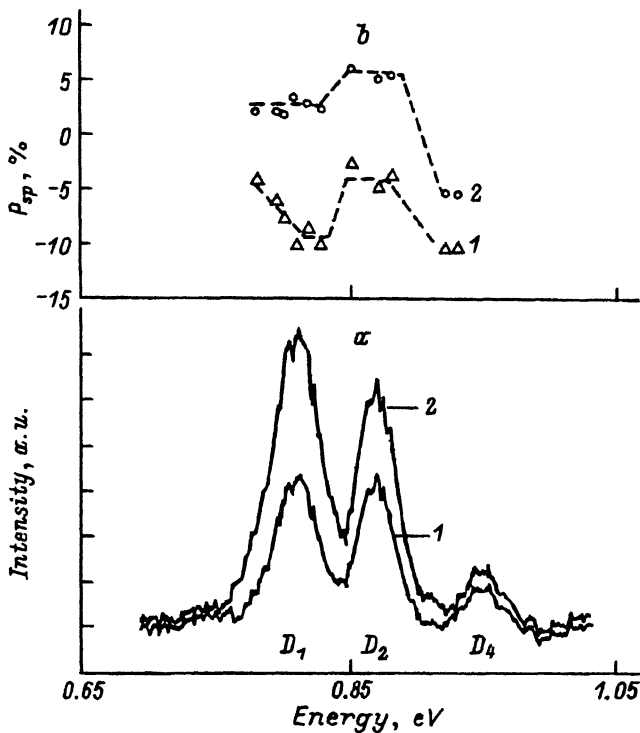


Рис. 2. а) Спектр фотолюминесценции образца G440/8 до (1) и после (2) УЗО. б) Спектральная зависимость линейной поляризации до (1) и после (2) УЗО.

Для выяснения природы происходящих в результате УЗО процессов исследовалась спонтанная поляризация линий фотолюминесценции  $P_{sp}$ , зависимость которой от энергии квантов люминесценции для образца 247/7 приведена на рис. 2, б. Оказалось, что  $D$ -люминесценция линейно поляризована вдоль направления  $[01\bar{1}]$ , соответствующего ориентации дислокаций в исследуемых пленках (вклад от дислокаций, ориентированных вдоль направления  $[0\bar{1}1]$ , незначителен в используемой схеме регистрации). Величина  $P_{sp}$  различна не только для разных  $D$ -линий, но и в пределах  $D_1$ -полосы.

УЗО на свету вызывала значительные изменения спонтанной поляризации фотолюминесценции (рис. 3, б, с). После первой УЗО величина  $P_{sp}$   $D_1$ - и  $D_2$ -линий люминесценции заметно возросла (даже с изменением знака для образца G247/7) при практически неизменной поляризации  $D_4$ -линии. В результате последующих обработок происходило обратное падение спонтанной поляризации  $D_1$ - и  $D_2$ -линий (вплоть до нуля) и выравнивание значения  $P_{sp}$  в пределах одной полосы (рис. 2, б). Следует отметить, что, хотя сама величина исходной спонтанной поляризации существенно отличалась для исследованных образцов (от  $8 \div 10\%$  для образца G247/7 до  $+30 \div 40\%$  для образца A10,  $h\nu = 0.812$  eV), характер стимулированных УЗО изменений  $P_{sp}$  был подобным. Исключение составляли образцы с изначально незначитель-

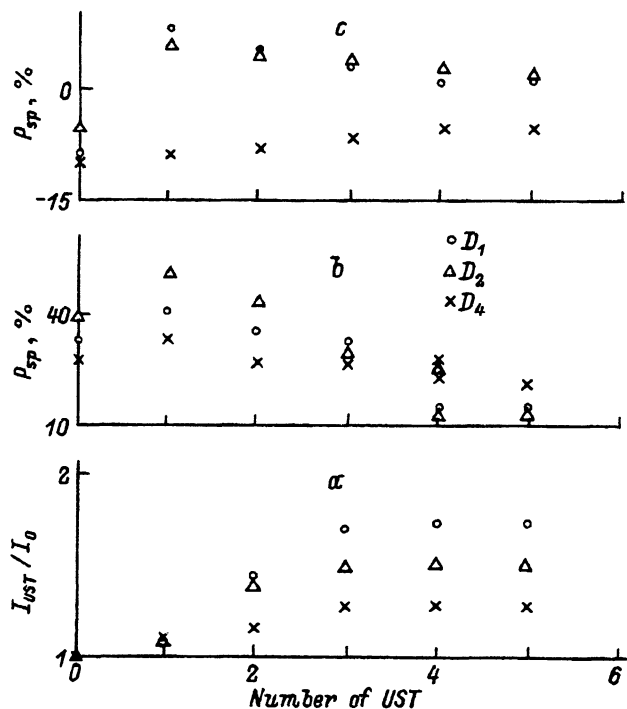


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности  $D$ -линий фотолюминесценции от количества УЗО (а). Изменение величины  $P_{sp}$  после УЗО для образцов G247/7 (с) и A10 (b).

ной поляризацией свечения ( $\sim 3 \div 5\%$ ), где УЗО не наблюдалась в пределах погрешности измерений.

Рост интенсивности линий фотолюминесценции во многих случаях не коррелировал с изменением их поляризации. Так, для образцов с небольшим исходным значением  $P_{sp}$  наблюдался рост интенсивности фотолюминесценции без изменения поляризации свечения. В то же время для ряда образцов ультразвуковое воздействие существенно изменяло поляризацию свечения без изменения интенсивности фотолюминесценции.

### 3. Обсуждение результатов

Для выяснения природы происходящих в результате УЗО процессов существенно, что УЗО не приводило к изменениям профиля распределения основных компонентов твердого раствора  $Ge_xSi_{1-x}$  в эпитаксиальной пленке (рис. 1), не влияла на дефектную структуру слоя. Экспериментально это проявляется в росте интенсивности дислокационных полос свечения, а также в изменении их спонтанной поляризации (рис. 2). Эти два типа эффектов, вероятно, имеют различную природу, поскольку корреляция между ними не наблюдалась.

Рассмотрим вначале возможный механизм увеличения интенсивности  $D$ -линий фотолюминесценции после УЗО. Предполагается, что данные полосы в кристаллах Si и SiGe имеют дислокационную природу [14-17]. Исследования пространственного распределения сигнала

катодолюминесценции показали [15], что полосы  $D_1$  и  $D_2$  обусловлены излучательной рекомбинацией неравновесных носителей на примесных центрах, локализованных вблизи дислокаций, а линии  $D_3$  и  $D_4$  — непосредственно на ядре дислокации. Наблюдаемый нами рост интенсивности  $D_1$ - и  $D_2$ -люминесценции после УЗО при практически неизменной интенсивности  $D_4$ -линии может свидетельствовать о росте концентрации примесей вблизи дислокаций, т.е. о стимулированном ультразвуком дислокационном геттерировании. Действительно, эффект дислокационного геттерирования примесей экспериментально наблюдался, в частности, как разгорание  $D_1$ - и  $D_2$ -линий фотолюминесценции после легирования особо чистых эпитаксиальных пленок Si примесью переходных металлов [21]. Известный механизм данного эффекта состоит в следующем.

Вновь образованная дислокация имеет нескомпенсированный электрический заряд и вызывает значительную деформацию кристаллической решетки в придислокационной области. Наличие электрического и деформационного полей вызывает диффузию и дрейф примесей и дефектов к дислокации, т.е. их геттерирование. Результатом является создание котрелловской атмосферы вокруг дислокации, экранирующей ее электрический заряд и уменьшающей деформацию решетки вблизи дислокации.

Эффект геттерирования может быть дополнительно стимулирован ультразвуком. Взаимодействие ультразвуковой волны с дислокацией обычно рассматривается в рамках так называемой струнной модели [13]. Она основана на предположении, что дислокация ведет себя подобно натянутой струне, закрепленной либо точечными дефектами, либо узлами дислокационной сетки. Под действием ультразвуковой волны происходят вынужденные колебания дислокации, амплитуда которых зависит от величины создаваемого ультразвуковой волной механического напряжения. При некотором пороговом напряжении ультразвука происходит отрыв дислокации от точки закрепления (стопора). Колебания дислокации создают в придислокационной области переменный электрический и деформационный потенциалы, величина которых определяется амплитудой колебаний дислокации и резко увеличивается после ее отрыва от стопора. Естественно предположить, что стимулированное ультразвуковое геттерирование дефектов дислокацией будет эффективным именно в режиме ее отрыва от стопоров.

Известно [22], что критическая амплитуда отрыва в кристаллах Si при комнатной температуре составляет  $\epsilon_{th} \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$  в зависимости от энергии связи дислокации со стопором. Максимальная величина деформации, создаваемой ультразвуковой волной, в наших экспериментах составляла  $(5 \div 7) \cdot 10^{-6}$ , т.е. была несколько ниже критических значений. Это, по-видимому, и обуславливает отсутствие УЗО в темновом режиме. В то же время освещение кристалла приводит к значительному уменьшению энергии связи дислокации со стопором [23] и, следовательно, к уменьшению величины  $\epsilon_{th}$ . Это хорошо согласуется с наблюдаемым экспериментально ростом интенсивности фотолюминесценции при комбинированном действии звука и света.

Заметим, что увеличение концентрации примеси в придислокационной области приводит как к росту (при малых концентрациях приме-

си) [15], так и падению интенсивности  $D$ -люминесценции [15,17]. Следовательно, характер вызванных УЗО изменений должен существенно меняться в зависимости от концентрации примеси в образцах, что является предметом дальнейших исследований.

В рамках предлагаемой модели можно объяснить также слабое изменение интенсивности  $D_4$ -линии после УЗО. Данная полоса люминесценции связана с рекомбинацией на ядре дислокации и будет слабо чувствительна к изменениям в придислокационной области.

Мы должны отметить относительно низкую эффективность ультразвукового геттерирования, наблюдаемого на наших образцах, по сравнению с геттерирующей способностью вновь созданных дислокаций. Об том свидетельствует как относительно слабое (до 75%) изменение интенсивности фотолюминесценции, так и незначительное изменение ЕВІС контраста, измеренного на тех же образцах до и после УЗО. Возможной причиной является наличие уже сформированной примесной атмосферы у существующей дислокации, которая может быть лишь незначительно изменена УЗО до равновесного значения.

Как уже указывалось выше, УЗО приводит также к значительному изменению поляризации  $D_1$ - и  $D_2$ -люминесценции. Результатом серии УЗО является уменьшение величины линейной поляризации этих линий, а также исчезновение зависимости  $P_{sp}$  от длины волны люминесценции в пределах одной полосы фотолюминесценции.

Поляризационные характеристики  $D$ -линий в Si были подробно изучены в [17,24-26]. Было показано, что излучение дислокаций в большинстве случаев хорошо описывается излучением электрических диполей, ориентированных вдоль дислокационных линий. Согласно теоретическим оценкам [27], величина поляризации является мерой деформации, существующей в придислокационной области. Следовательно, зависимость величины  $P_{sp}$  от длины волны люминесценции, наблюдаемая для  $D_1$ -фотолюминесценции на исходных образцах, может быть обусловлена разной деформацией решетки вблизи центров свечения вследствие их различного пространственного расположения по отношению к ядру дислокации [15].

Мы предполагаем, что действие ультразвуковой волны приводит к переориентации центров свечения так, чтобы максимально уменьшить деформацию решетки в придислокационной области. В этом случае наблюдаемый после первой УЗО рост спонтанной поляризации вызван выходом центров свечения из квазиравновесного положения, а последующее уменьшение величины  $P_{sp}$  — их переходом в новое положение в решетке, соответствующее ее минимальной деформации (минимум поляризации). Новое положение центров свечения, по-видимому, является равновесным, поскольку а) в кристаллах с изначально малой поляризацией фотолюминесценции УЗО не меняет величину  $P_{sp}$ ; б) в тех случаях, когда наблюдается релаксация обработки, она происходит в сторону дальнейшего уменьшения  $P_{sp}$ . Для выяснения элементарного механизма данного эффекта проводятся дополнительные исследования.

Таким образом, в настоящей работе обнаружено влияние ультразвука допороговой мощности на интенсивность и поляризационные характеристики  $D$ -линий фотолюминесценции эпитаксиальных пленок GeSi. Для объяснения обнаруженного эффекта предлагаются два механизма УЗО: а) стимулированное ультразвуковое геттерирование



точечных дефектов дислокаций, б) переориентация расположенных в придислокационной области примесей и дефектов для уменьшения имеющейся в этой области деформации решетки.

Авторы благодарят Американское физическое общество за финансовую поддержку согласно гранту N P2U-0115-0925.

### Список литературы

- [1] Здебский А.П., Лукьянчикова Н.Б., Лисянский М.И., Шейнкман М.К. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 1009-1012.
- [2] Здебский А.П., Корчная В.Л., Торчинская Т.В., Шейнкман М.К. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 2. С. 76-81.
- [3] Громашевский В.Л., Дякин В.В., Сальков Е.А., Скляров С.М., Халимова Н.С. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 4. С. 550-554.
- [4] Грабчак В.П., Кулин А.В. // Акуст. журн. 1976. Т. 22. № 6. С. 838-844.
- [5] Buyanov I.A., Ostapenko S.S., Savchuk A.U., Sheinkman M.K. // Proc. 17th Int. Conf. on Def. in Semicond., Gmunden, Austria, 1993.
- [6] Belyaev A.E., Oborina E.I., Ryabchenko Yu.S., Savchuk A.U., Sheinkman M.K., Bardeleben H.J., Fille M.F. // Proc. 17th Int. Conf. on Def. in Semicond., Gmunden, Austria, 1993.
- [7] Островский И.В. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. № 8. С. 463-466.
- [8] Бритун В.Ф., Горидько Н.Я., Корчная В.Л., Семенова Г.Н., Скороход М.Я., Тхорик Ю.А., Хазан Л.С., Шейнкман М.К. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 8. С. 2340-2344.
- [9] Бабенцов Б.Н., Горбань С.И., Городецкий И.Я., Корсунская Н.У., Паренко И.М., Шейнкман М.К. // ФТП. 1991. Т. 25. № 7. С. 1243-1245.
- [10] Здебский А.П., Миронюк Н.В., Остапенко С.С., Савчук А.У., Шейнкман М.К. // ФТП. 1986. Т. 20. № 10. С. 1861-1867.
- [11] Здебский А.П., Шейнкман М.К., Аннаниязов А., Гарягдыев Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 4. С. 1135-1140.
- [12] Здебский А.П., Кропман Д.И., Шейнкман М.К. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 8. С. 131-134.
- [13] Гранато А., Люкке К. // Физическая акустика. Т. IV. Ч. А / Под ред. У.Мэзона. М., 1969.
- [14] Alexander H., Kisielowski-Kimmerich C., Weber E.R. // Physica B. 1983. V. 116. P. 583-593.
- [15] Lightowlers E.C., Higgs V. // Phys. Stat. Sol. (a). 1993. V. 138. N 2. P. 665-672.
- [16] Lelikov Yu.S., Rebane Yu.T., Rumikov S., Sitnikova A.A., Tarhin D.V., Shreter Yu.G. // Phys. Stat. Sol. (b). 1992. V. 172. N 1. P. 53-59.
- [17] Weronek K., Weber J., Hopner A., Ernst F., Buchnek R., Stefaniak M., Alexander H. // Mat. Sci. Forum. 1992. V. 83-87. P. 1315-1320.
- [18] Ostapenko S.S. // (to be published).
- [19] Буянов А.В., Лютович К.Л., Пека Г.П., Ткаченко В.В. // ФТП. 1991. Т. 25. № 10. С. 1711-1717.
- [20] Michel J., Fitzgerald E.A., Xie Y.-H., Silverman P.J., Morse M., Kimerling L.C. // J. Elec. Mat. 1992. V. 21. N 12. P. 1099-1103.
- [21] Higgs V., Lightowlers E., Davies G., Schaffler F., Kasper E. // Semicon. Sci. Technol. 1989. V. 4. N 2. P. 593-601.
- [22] Александров Л.Н., Зотов М.И. Внутреннее трение и дефекты в полупроводниках. Новосибирск: Наука, 1979. 159 с.
- [23] Kusters K.H., Alexander H. // Physica B. 1982. V. 116. N 2. P. 594-599.
- [24] Suezawa M., Sasoki Y., Nishina K., Sumino K. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. V. 20. N 7. P. L537-L540.
- [25] Suezawa M., Sumino K., Nishina K. // Jap. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 8. P. L518-L520.
- [26] Изотов А.И., Штейнман Э.А. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 4. С. 1015-1019.
- [27] Colbourne P.D., Cassidy D.T. // Can. J. Phys. 1992. V. 70. N 10-11. P. 803-812.

Институт физики полупроводников АН Украины  
Киев

Поступило в Редакцию  
25 марта 1994 г.