

Исследование механических напряжений в селективно-оксидированных структурах GaAs/(AlGa)_xO_y

© С.А. Блохин[¶], А.Н. Смирнов, А.В. Сахаров, А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, Н.А. Малеев,
А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, Д.А. Бедарев, Е.В. Никитина, М.М. Кулагина, М.В. Максимов,
Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 7 декабря 2004 г. Принята к печати 22 декабря 2004 г.)

Для изучения процесса селективного оксидирования слоев Al_{0.97}Ga_{0.03}As применена спектроскопия комбинационного рассеяния света. Определены механические напряжения, возникающие в структурах GaAs/(AlGa)_xO_y при различных режимах процесса селективного оксидирования. Проанализированы эффекты локального нагрева образцов лазерным излучением при измерениях комбинационного рассеяния света, „задубливания“ фоторезиста при оксидировании и „перексидирования“. Проведена оптимизация аппаратуры и методики селективного оксидирования, позволившая реализовать матрицы вертикально излучающих лазеров с активной областью на основе двух квантовых ям InGaAs с верхним оксидированным и нижним полупроводниковым распределенными брэгговскими отражателями.

1. Введение

Технология селективного оксидирования слоев AlGaAs, предложенная около десяти лет назад [1], в настоящий момент широко применяется при изготовлении различных оптоэлектронных приборов на соединениях A^{III}B^V: светодиодов [2], МОП транзисторов [3], оптических волноводов [4] и вертикально излучающих лазеров на основе микрорезонаторов (ВИЛ) [5]. Уникальность данной технологии состоит в том, что она позволяет создавать скрытые диэлектрические слои высокого структурного качества с требуемыми электрическими и оптическими параметрами, которые не только обеспечивают эффективное электронное ограничение и существенное уменьшение внутренних оптических потерь в ВИЛ (в сравнении с протонной имплантацией) [6], но и позволяют сформировать распределенные брэгговские отражатели в широком спектральном диапазоне, а также уменьшать дифракционные оптические потери в вертикальном микрорезонаторе [6].

Однако до сих пор существует ряд нерешенных проблем в отношении технологии селективного оксидирования. К их числу относится проблема механической надежности и стабильности приборов после оксидирования. Следует отметить, что селективное оксидирование AlAs (при температурах не более 500°C) приводит к образованию аморфной матрицы (AlGa)_xO_y, которая в дальнейшем частично трансформируется в γ-Al₂O₃ [7]. Однако γ-фаза оксида алюминия значительно плотнее исходного AlAs, что приводит к линейному сжатию слоя после оксидирования. В самом деле, объем, приходящийся на атом Al в AlAs, составляет 3.57 Å³, тогда как в γ-Al₂O₃ он порядка 2.85 Å³, что соответствует линейному сжатию 20%. Конкретная степень сжатия для данной структуры будет зависеть как от толщины и состава слоев, так и от параметров процесса оксидирования.

В связи с этим актуальна задача исследования процессов механической деформации структур при различных режимах селективного оксидирования.

Хорошо известно, что спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) позволяет качественно оценить механические напряжения, существующие в полупроводниках [8,9]. Подобный подход широко используется, например, для исследования локальных напряжений, возникающих в кремниевых интегральных микросхемах на различных этапах изготовления [10]. Так, в случае однородного биаксиального напряжения в плоскости *xу* (в плоскости эпитаксиальной структуры) тензор напряжений (для структур с кристаллической решеткой цинковой обманки) имеет только две ненулевые компоненты $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma$, а тензор деформации содержит три ненулевые компоненты

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{||} = (S_{11} + S_{12})\sigma \quad \text{и} \quad \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp} = 2S_{12}\sigma,$$

где $S_{11} = 1.17 \cdot 10^{-2}$ ГПа⁻¹ и $S_{12} = -3.64 \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹ — постоянные упругой податливости в GaAs при 300 К [11]. Тогда сдвиг $\Delta\omega_{LO}$ LO-фононной линии в GaAs относительно LO-фононной линии в недеформированном арсениде галлия, возникающий из-за напряжения σ , описывается следующим выражением:

$$\Delta\omega_{LO}(\text{см}^{-1}) = \omega_{LO}[pS_{12} + q(S_{11} + S_{12})]\sigma = -3.9\sigma(\text{ГПа}),$$

где $p = -1.753$ и $q = -2.453$ — фононные деформационные потенциалы, $\omega_{LO} = 292 \text{ см}^{-1}$ — частота LO-фонона в недеформированном арсениде галлия [10]. Отметим, что биаксиальное напряжение сжатия будет приводить к увеличению частоты фонона, тогда как напряжение растяжения будет приводить к уменьшению частоты.

Таким образом, спектроскопия КРС может быть применена для количественной оценки механических напряжений и деформаций, существующих в структурах GaAs/(AlGa)_xO_y при условии, что селективное оксидирование вызывает биаксиальные напряжения в плоскости эпитаксиальной структуры.

[¶] E-mail: blokh@mail.ioffe.rssi.ru

2. Эксперимент

Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32P с твердотельным источником As на полуизолирующей подложке GaAs (100). После осаждения буферного слоя GaAs выращивался слой Al_{0,97}Ga_{0,03}As (227 нм), который затем зарастивался слоем GaAs (94 нм). Толщины слоев подобраны так, чтобы после оксидирования они образовывали один период диэлектрического распределенного брэгговского отражателя (AlGa)_xO_y/GaAs для диапазона 1.3 мкм. Используя стандартную фотолитографию (фоторезист ФП-9120), в комбинации со специальной методикой „задубливания“ фоторезиста [12], и метод сухого травления в пучке ионов Ag⁺ (установка ионного травления MIM TLA 20), были изготовлены два типа меза-структур с шириной полоска 100 и 30 мкм. Расстояние между полосками составляло 350 мкм, а глубина травления порядка 1 мкм. После формирования меза-структур проводилось селективное оксидирование тестовых образцов в различных режимах.

Спектры КРС измерялись в геометрии рассеяния назад $z(x, x)\bar{z}$ при комнатной температуре. В качестве источника возбуждения использовался Ag⁺-лазер с длиной волны 488 нм. Для калибровки монохроматора применялась Ne-лампа. Характерная длина поглощения излучения Ag⁺-лазера (на данной длине волны) в GaAs порядка 100 нм, поэтому вкладом буфера и подложки в регистрируемый сигнал можно пренебречь.

3. Результаты и обсуждение

Традиционная аппаратура для проведения процессов селективного оксидирования представляет собой кварцевый реактор открытого типа с резистивным или ламповым нагревом (рис. 1, *a*). Поток газа-носителя (обычно сухого азота) проходит через нагреваемый барбатер, где насыщается парами воды, и поступает в зону реакции. Здесь в течение заданного времени происходит процесс латерального оксидирования слоев AlGaAs при характерной температуре 350–450°C, причем глубина оксидирования сильно зависит не только от состава и толщины слоев, но и от начального состояния поверхности после сухого травления [13]. Для того чтобы избежать влияния повреждения и загрязнения поверхности, вызванного сухим травлением, сразу после сухого травления проводилось дополнительное химическое травление в растворе NH₄OH : H₂O₂ : H₂O (1 : 2 : 50) в течение 4 с при комнатной температуре. Однако в результате предварительных исследований выяснилось, что состояние поверхности зависит не только от метода ее обработки, но и от количества адсорбированных молекул воды. Поэтому важным элементом технологии селективного оксидирования является предварительный прогрев образца при температурах 150–200°C для удаления этой воды. Кроме того, после завершения процесса для повышения механической надежности оксидированных структур требуется высокотемпературный

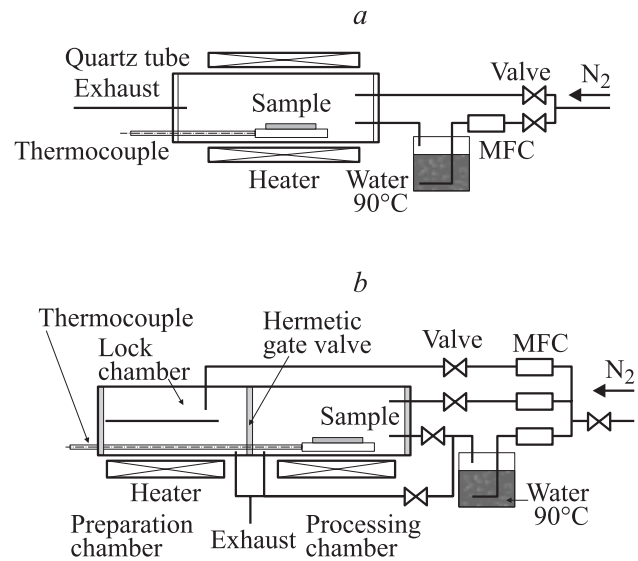


Рис. 1. Схемы стандартной (*a*) и разработанной (*b*) аппаратуры для проведения процессов селективного латерального оксидирования слоев AlGaAs в паре воды.

отжиг, который обеспечивает эффективное удаление остаточных продуктов из оксидированных слоев [14].

Для выполнения всех перечисленных требований к процессу селективного оксидирования нами была разработана и изготовлена двухкамерная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, *b*. Наличие двух независимых камер позволяет постоянно поддерживать стабильные условия в рабочей камере (поток газа-носителя, насыщение парами воды и температура), быстро завершать процесс путем продувки рабочей камеры сухим азотом и проводить высокотемпературный отжиг образца в атмосфере сухого азота без экспонирования на воздух, а также проводить предварительный прогрев структур в загрузочной (подготовительной) камере. Проведенные эксперименты показали, что такая конструкция обеспечивает высокую воспроизводимость и стабильность параметров селективного оксидирования.

В ходе проведенного исследования выяснилось, что оптимальным с точки зрения качества и механической стабильности структуры является оксидирование в режиме насыщения (когда скорость реакции окисления не зависит от скорости подачи паров воды в камеру) и при умеренных температурах (400–440°C). Однако при длительности процесса окисления больше 30 мин наблюдается ухудшение морфологии поверхности, связанное с частичным окислением верхнего слоя арсенида галлия, что в свою очередь может приводить к нежелательному вертикальному оксидированию поверхностных слоев (рис. 2, *a*) или к окислению по дефектам (рис. 2, *b*).

Для того чтобы устранить эти эффекты, используют защитные маски, обычно нитрид кремния [6]. В данной работе в качестве маски использовался фоторезист. Такой подход обеспечивает уменьшение числа технологических операций по сравнению с традиционной технологией формирования ВИЛ. В результате изго-

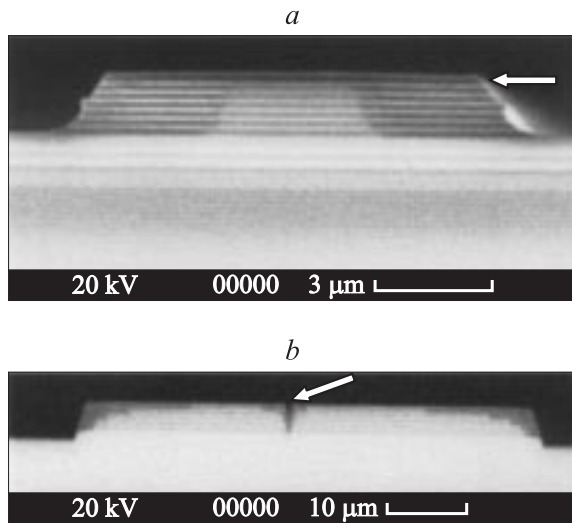


Рис. 2. СЭМ-изображения скола структур после процесса селективного оксидирования. Стрелками показаны нежелательное вертикальное оксидирование (*a*) и окисление по дефектам (*b*).

товление ВИЛ с верхним оксидированным зеркалом и оксидированными апертурами включает травление первой мезы (меньшего размера) до скрытого контактного *p*-слоя и ее селективное оксидирование под защитой фоторезиста для формирования верхнего зеркала, после чего проводится травление второй мезы (большого размера) до скрытого контактного *n*-слоя и селективное оксидирование апертурных слоев [12]. Затем осуществляется формирование омических контактов *p*- и *n*-типа, пассивация приборной структуры диэлектриком, изолирующая имплантация, вскрытие контактных окон и формирование контактных площадок.

Основная задача работы состояла в оценке механических напряжений, возникающих при селективном оксидировании ВИЛ. С этой целью были подготовлены несколько серий тестовых образцов. Сравнение проводилось с образцом *A*, представляющим собой исходную структуру, не подвергнутую никакой обработке. Для анализа влияния высокотемпературного отжига на механическую стабильность прооксидированных образцов использовалась первая серия на основе меза-структур с шириной полоска 100 мкм (образцы *B*, *C*). Эти образцы были подвергнуты латеральному селективному оксидированию при температуре 420°C в течение 90 мин, а образец *C* подвергался дополнительному отжигу при температуре 420°C в течение 30 мин. Режим оксидирования выбран так, чтобы обеспечить глубину оксидирования не менее 30 мкм (диаметр пятна сфокусированного лазерного луча менее 30 мкм). Для того чтобы оценить механические напряжения, возникающие вследствие „задубливания“ фоторезиста при оксидировании, была создана вторая серия (образцы *BA*, *CA*), аналогичная первой, но вместо паров воды в камеру подавался сухой азот (т.е. была проведена имитация процесса оксидирования). Большой прикладной интерес вызыва-

ет эффект „переоксидирования“. Для его исследования была создана третья серия образцов на основе меза-структур с шириной полоска 30 мкм (образцы *D1*, *D2*, *D3*). Данные образцы были подвергнуты селективному оксидированию при температуре 420°C в течение 45 мин (образец *D1*), 60 мин (образец *D2*), 75 мин (образец *D3*) и дополнительному отжигу (420°C, 30 мин). При выбранных режимах оксидирования для полного окисления всего слоя $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ достаточно 45 мин, т.е. для образцов *D2*, *D3* имеет место „переоксидирование“.

Для того чтобы корректно оценить механические напряжения, возникающие в структуре вследствие оксидирования, необходимо отделить возможные напряжения, обусловленные фотолитографией со специальной методикой „задубливания“ фоторезиста и сухим травлением в пучке ионов Ar^+ . Измерения КРС, проведенные для исходной структуры *A* и структуры *AE*, прошедшей весь технологический процесс (за исключением селективного оксидирования), свидетельствуют о том, что технологические операции, предшествующие оксидированию, не вносят заметных механических напряжений в структуру в пределах погрешности измерений.

На рис. 3 представлены спектры КРС для образцов *A*, *B*, *C*. Узкие пики на 292 и 403 cm^{-1} соответствуют *LO*-фононам GaAs и AlAs соответственно. Слабо выраженные пики на 269 и 361 cm^{-1} соответствуют *TO*-фононам GaAs и AlAs соответственно, хотя по правилам отбора в геометрии рассеяния назад $z(x, x)z$ *TO*-фононные линии запрещены. После оксидирования (структуры *B* и *C*) пики, связанные с AlAs, исчезли, что свидетельствует о его полной трансформации в $(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ (слабо выраженная особенность на 587 cm^{-1} [15]). Кроме того, в структуре *B* наблюдается слабо выраженный широкий пик на 475 cm^{-1} , обусловленный аморфным As_2O_3 , и широкая особенность в

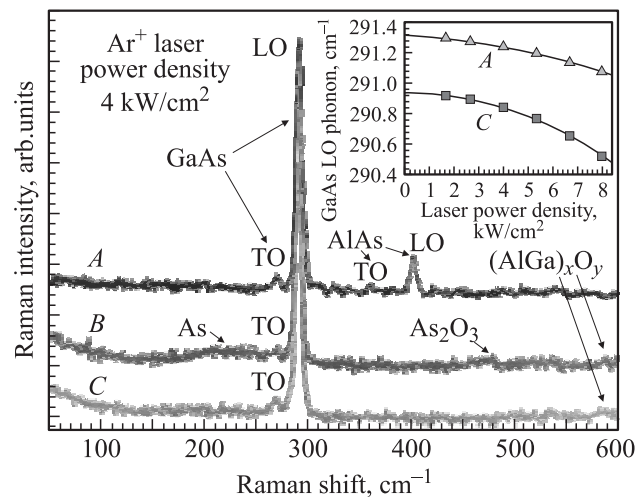


Рис. 3. Спектры КРС исходной структуры *A* и образцов *B*, *C* (после проведения процесса селективного оксидирования образец *C* дополнительно отжигался). На вставке — зависимости положения *LO*-фонона в GaAs от мощности накачки Ar^+ -лазером для структур *A* и *C*.

диапазоне от 180 до 280 см⁻¹, которая представляет собой суперпозицию нескольких пиков, связанных с кристаллическим As (198 см⁻¹), аморфным As (227 см⁻¹) и *TO*-фононом GaAs [16]. Наличие аморфного As₂O₃ приводит к тому, что диффузия через оксид к фронту реакции становится основным механизмом, лимитирующим скорость окисления, что в частности, объясняет наблюдаемую параболическую зависимость глубины окисления от времени для исследованных образцов.

Механическая стабильность оксидного слоя сильно зависит от количества остаточных (промежуточных) продуктов реакции окисления [14], а наличие в оксиде остаточного As приводит к пиннингу уровня Ферми на интерфейсе (AlGa)_xO_y/GaAs, что в свою очередь сказывается на электрических свойствах оксида [15]. Однако не меньшее влияние оказывает и структура самого оксида. Как известно, при окислении AlGaAs трансформируется в аморфный (AlGa)_xO_y, который дополнительно содержит гидроксиды алюминия: AlO(OH) и Al(OH)₃. Эти соединения метастабильны и при комнатной температуре могут вызывать продолжение реакции окисления AlGaAs [7,16]. Однако при температурах выше 350°C эти гидроксиды трансформируются в γ -Al₂O₃. Кроме того, при отжиге остаточный As может взаимодействовать с указанными гидроксидными группами, что приводит к существенному снижению уровня гидроксидных групп в слое (AlGa)_xO_y [17]. Следовательно, отжиг структуры не только удаляет остаточные продукты реакции, но и частично трансформирует аморфный (AlGa)_xO_y в более стабильную фазу γ -(AlGa)_xO_y.

Высокотемпературный отжиг образцов проводился непосредственно в камере (без охлаждения и экспонирования на воздух) в атмосфере сухого азота. Предварительные исследования показали, что оптимальной с точки зрения механической стабильности температурой отжига является рабочая температура процесса окисления. Причем при глубине окисления около 30 мкм достаточно времени отжига порядка 30 мин. Измерение спектра КРС для структуры *C*, отожженной при оптимальных условиях, не выявило особенностей, связанных с As и As₂O₃. Процедуры быстрого термического отжига (имитация вжигания контактов) после экспонирования структуры на воздух не выявили никаких признаков расслоения структуры *C*, что позволяет говорить о высокой механической стабильности окисленной структуры (рис. 4, *a*).

При анализе механических напряжений в структуре необходимо учитывать возможный нагрев образца лазерным излучением. Известно, что локальный перегрев, появляющийся из-за сфокусированного лазерного луча, вносит свой вклад в сдвиг фоновой линии GaAs. Для того чтобы отделить эффект нагрева, мы измерили зависимости положения пика *LO*-фонона GaAs от мощности накачки Ar⁺-лазером для образцов *A* и *C* (см. вставку к рис. 3). Для исходной структуры (*A*) сдвиг пика из-за эффекта перегрева составил около 0.2 см⁻¹, тогда как для образца *C* наблюдается значительный сдвиг

порядка 0.4 см⁻¹. Этот факт объясняется значительной разницей коэффициентов теплопроводности AlGaAs и (AlGa)_xO_y (аморфный (AlGa)_xO_y является диэлектриком с низкой теплопроводностью). Экстраполяция экспериментальных кривых до нулевой плотности мощности лазера дает реальный сдвиг фоновой линии GaAs $\Delta\omega_{LO} = -0.39$ см⁻¹, соответствующий растяжению в плоскости структуры (отрицательный сдвиг фоновой линии). Отметим также и тот факт, что уже изначально верхний эпитаксиальный слой GaAs несколько напряжен ($\sigma \approx 18$ МПа, напряжение растяжения). Это вызвано тем, что постоянная решетки AlAs больше постоянной решетки GaAs.

Для того чтобы корректно оценить напряжения, вносимые селективным окислением слоев AlGaAs с высоким содержанием Al, необходимо отдельно оценить вклад, который может вносить эффект „задубливания“ фоторезиста при окислении. С этой целью мы имитировали процесс окисления — вместо паров воды в камеру подавался сухой азот. На рис. 5 пред-

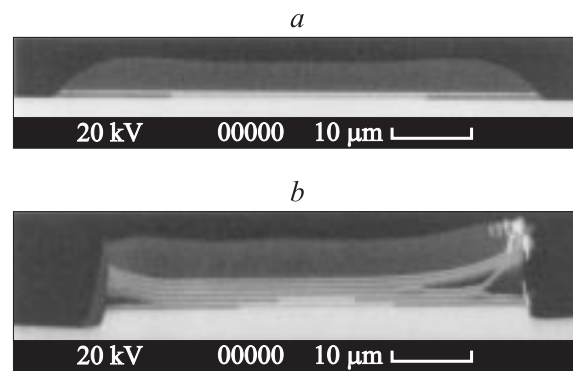


Рис. 4. СЭМ-изображения скола исследуемой структуры после процесса селективного окисления при температуре 420°C (*a*) и тестовой структуры после процесса селективного окисления при температуре 450°C (*b*) (используется для калибровки скорости окисления в зависимости от мольной доли Al в слоях AlGaAs).

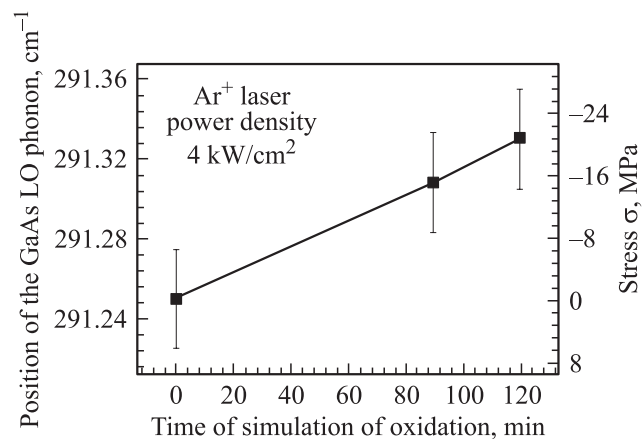


Рис. 5. Зависимость положения GaAs-*LO*-фононной линии и величины напряжения растяжения σ от времени отжига в атмосфере сухого азота (имитация селективного окисления).

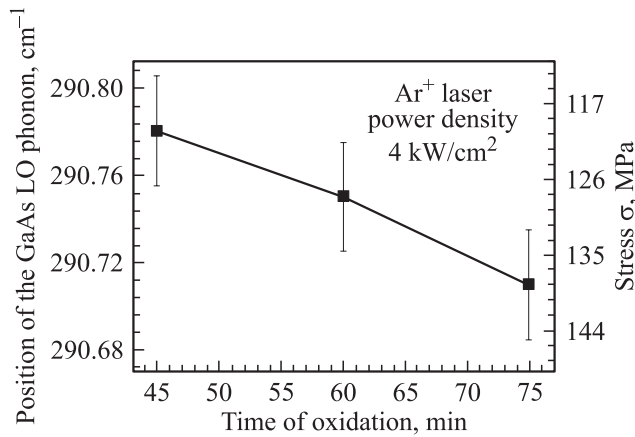


Рис. 6. Зависимость положения GaAs-LO-фононной линии и величины напряжения сжатия σ от времени селективного оксидирования.

ставлены результаты измерений КРС для образцов А, ВА и СА. Видно, что вклад в напряжения, связанный с „задубливанием“ фоторезиста, относительно мал ($\sigma \approx -18$ МПа) и соответствует сжатию в плоскости структуры (положительный сдвиг фононной линии). Все это хорошо коррелирует с тем, что при высоких температурах (выше 400°C) фоторезист „задубливается“ и сжимается. Таким образом, фоторезист еще и частично компенсирует напряжения в приповерхностном слое, вызванные оксидированием. Однако необходимо отметить, что при температурах оксидирования выше 450°C сжатие фоторезиста достигает такой силы, что происходит полное разрушение (расплавление) структуры, которую он покрывает (рис. 4, b).

В результате, с учетом эффектов локального перегрева образца лазерным излучением и „задубливания“ фоторезиста при оксидировании, истинный сдвиг фононной линии составляет $\Delta\omega_{LO} = -0.46 \text{ cm}^{-1}$, а соответствующий уровень напряжения растяжения $\sigma = 118$ МПа. Таким образом, в нашем случае оксидирование вызывает деформацию растяжения $\varepsilon_{\parallel} = 9.38 \cdot 10^{-4}$ в плоскости структуры и деформацию сжатия $\varepsilon_{\perp} = -8.67 \cdot 10^{-4}$ в направлении роста структуры. Это коррелирует с ранее опубликованными данными для структур GaAs/(AlGa)_xO_y со слоями AlAs и Al_{0.98}Ga_{0.02}As толщиной 100 нм [18].

Результаты влияния эффекта „переоксидирования“ (случай, когда времена процесса превышают необходимое для полного оксидирования) на механические напряжения представлены на рис. 6 (с учетом всех указанных выше эффектов). После 45 мин оксидирования AlGaAs слой полностью трансформируется в (AlGa)_xO_y. Видно, что дальнейшее увеличение времени процесса уменьшает механическую стабильность структуры из-за слишком сильного сжатия слоев. Кроме того, „переоксидирование“ приводит к снижению коэффициента отражения зеркал и искажению формы спектра отражения из-за ухудшения морфологии и наличия внутренних напряжений [19].

В результате проведенных исследований по оптимизации воспроизводимости и стабильности параметров селективного оксидирования и обеспечению необходимой механической стабильности структур ВИЛ удалось реализовать матрицы, содержащие 8×8 ВИЛ с активной областью на основе квантовых ям InGaAs. Индивидуально адресуемые излучатели демонстрируют лазерную генерацию в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговыми токами 1.0–2.5 мА на длине волны 960–965 нм при дифференциальной эффективности до 0.04 мВт/мА и максимальной выходной мощностью более 2 мВт [20].

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведены исследования механических напряжений, возникающих в структурах GaAs/(AlGa)_xO_y при селективном оксидировании слоев AlGaAs. Показано, что оксидирование приводит к возникновению напряжений растяжения в слоях GaAs. В то же время использование фоторезиста в качестве защитной маски при оксидировании вызывает напряжения сжатия вследствие „задубливания“ фоторезиста при высоких температурах. Рассмотрено влияние эффекта „переоксидирования“ на механическую стабильность структур. Разработанная и оптимизированная технология селективного оксидирования перспективна при создании индивидуальных ВИЛ и матричных излучателей для быстродействующих систем передачи и обработки информации.

Работа была поддержана программой Отделения физических наук РАН „Новые материалы и структуры“ и программой фундаментальных исследований президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“.

Список литературы

- [1] J.M. Dallesasse, N. Holonyak, A.R. Sugg, T.A. Richard, N. El-Zein. Appl. Phys. Lett., **57**, 2844 (1990).
- [2] D.L. Huffaker, C.C. Lin, J. Shin, D.G. Deppe. Appl. Phys. Lett., **66**, 3096 (1995).
- [3] E.I. Chen, N. Holonyak, S.A. Maranowski. Appl. Phys. Lett., **66**, 2688 (1995).
- [4] A. Fiore, V. Berger, E. Rosencher, N. Laurent, S. Teilmann, N. Vodjdani, J. Nagle. Appl. Phys. Lett., **68**, 3357 (1996).
- [5] D.L. Huffaker, D.G. Deppe, K. Kummar, T.J. Rogers. Appl. Phys. Lett., **65**, 97 (1994).
- [6] *Vertical cavity surface emitting lasers*, ed. by L.A. Coldren, H. Temkin and C.W. Wilmsen (Cambridg Univ. Press, 1999).
- [7] R.D. Twesten, D.M. Follstaedt, K.D. Choquette, R.P. Schneider. Appl. Phys. Lett., **69**, 19 (1996).
- [8] F. Cerdeira, C.J. Buchenauer, F.H. Pollak, M. Cardona. Phys. Rev. B, **5**, 580 (1972).
- [9] S.C. Jain, M. Willander, H. Maes. Semicond. Sci. Technol., **11**, 641 (1996).
- [10] Ingrid De Wolf. Semicond. Sci. Technol., **11**, 139 (1996).
- [11] G. Landa, R. Carles, C. Fontaine, E. Bedel, A. Munoz-Yague. Appl. Phys. Lett., **66**, 196 (1989).

- [12] H.A. Малеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Г. Кузьменков, Д.А. Бедарев, Ю.М. Задиранов, М.А. Кулагина, Ю.М. Шерняков, А.С. Шуленков, В.А. Быковский, Ю.М. Соловьев, С. Möller, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов. ФТП, **37**, 1265 (2003).
- [13] M. Creusen, F. de Btyun, F. Karouta, W.C. van der Vleuten, T.G. van de Roer, E. Smalbrugge, B.H. van Roy. Electrochem. Sol. St. Lett., **2**, 83 (1999).
- [14] H.Q. Jia, H. Chen, W.C. Wang, W.X. Wang, W. Li, Q. Huang, J. Zhou. J. Cryst. Growth, **223**, 484 (2001).
- [15] C.I.H. Ashby, J.P. Sullivan, P.P. Newcomer, N.A. Missert, H.Q. Hou, B.E. Hammons, M.J. Hafich, A.G. Baca. Appl. Phys. Lett., **70**, 2445 (1997).
- [16] A.R. Sugg, N. Holonyak, J.E. Baker, F.A. Kish, J.M. Dallesasse. Appl. Phys. Lett., **58**, 1199 (1991).
- [17] K.D. Choquette, K.M. Geib, C.I.H. Ashby, R.D. Twesten, O. Blum, H.Q. Hou, D.M. Follstaedt, B.E. Hammons, D. Mathes, R. Hull. IEEE J. Select. Topics in Quant. Electron., **3**, 916 (1997).
- [18] J.P. Landesman, A. Fiore, J. Nagle, V. Berger, E. Rosencher, P. Puech. Appl. Phys. Lett., **71**, 2520 (1997).
- [19] V.A. Haisler, F. Hopfer, R.L. Sellin, A. Lochmann, K. Fleischer, N. Esser, W. Richter, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **81**, 2544 (2002).
- [20] H.A. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.Е. Жуков и др. ФТП, **39** (4), 487 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

Mechanical stress in selective oxidized GaAs/(AlGa)_xO_y structures

S.A. Blokhin, A.N. Smirnov, A.V. Sakharov,
A.G. Gladyshev, N.V. Kryzhanovskaya, N.A. Maleev,
A.E. Zhukov, E.S. Semenova, D.A. Bedarev,
E.V. Nikitina, M.M. Kulagina, M.V. Maximov,
N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Raman spectroscopy was applied to the study selective oxidation processes of Al_{0.97}Ga_{0.03}As layers. The mechanical stress applied to GaAs/(AlGa)_xO_y structures by different regimes of selective oxidation processes was determined. Effects of local sample heating by the laser radiation under Raman measurement, photoresist hardening under oxidation and over-oxidation were analyzed. Optimization of apparatus and method of selective oxidation was done, that allowed realizing integrated matrix of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) based on double quantum well InGaAs active region with oxidized top and bottom distributed Bragg reflectors.