

Влияние энергии при ионно-химическом травлении структур GaAs/Al_xGa_{1-x}As на фотолюминесценцию и деградацию приборов

А.В.Зубанов, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин

Исследован процесс ионно-химического травления мезаполосок в эпитаксиальных структурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As с использованием системы с источником трансформаторно-связанной плазмы. Достоинством системы является высокая плотность плазмы в зоне обработки и, как следствие, низкая энергия ионов (100–200 эВ), которую можно регулировать независимо от уровня ВЧ мощности. Реализован процесс формирования узких (3–5 мкм) мезаполосок с наклоном боковых стенок ~ 85° и разбросом значений геометрических размеров ±1% в зоне обработки диаметром d = 150 мм. Показано, что в отличие от ВЧ травления значений фотолюминесценции в структурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As стабилизируется на уровне 15%–20% от исходного значения даже в случае приближения обрабатываемой поверхности к активной области на расстояние 100–150 Å. Проведены сравнительные испытания суперлюминесцентных диодов гребневидной конструкции, изготовленных с использованием источников ВЧ и трансформаторно-связанной плазмы.

Ключевые слова: источник трансформаторно-связанной плазмы, эпитаксиальная структура, полупроводниковый лазер, мезаполоска, интенсивность фотолюминесценции.

1. Введение

В последние годы ионно-химическое травление (ИХТ) широко используется при изготовлении на основе полупроводников A^{III}B^V различных оптоэлектронных приборов: одиночных лазеров, лазеров с вертикальным резонатором, суперлюминесцентных диодов, оптоэлектронных схем и лазерных линеек. Разработанные методики базируются либо на ИХТ, либо на его сочетании с жидкофазным химическим травлением [1].

Отличительной особенностью широкозонных оптоэлектронных материалов (GaAs, InP и их твёрдые растворы) является высокая чувствительность к ионному воздействию, которое может приводить к увеличению скорости поверхностной рекомбинации [2], росту собственного поглощения [3], возникновению электронных ловушек глубоких уровней [4]. Поэтому снижение энергии частиц при ионно-химической обработке является важным дополнительным требованием, предъявляемым к ионным источникам.

За рубежом для решения этой проблемы всё чаще используется травление в СВЧ системах в атмосфере Cl₂ [5]. Однако разработанные сверхвысоковакуумные установки с СВЧ источниками достаточно сложны и дорогостоящи. По нашему мнению, более перспективными для производства являются разработанные в последние годы источники индукционно- или трансформаторно-связанной плазмы (ТСП) [6], в которых реализуется высокая плотность плазмы (до 10¹² см⁻³) и которые можно рас-

сматривать как «энергетический» аналог СВЧ источников. Конструкция таких систем существенно проще, они производительнее и дешевле. В связи с этим несомненный практический интерес представляет использование источников ТСП в технологии светоизлучающих полупроводниковых приборов. В данной статье изложены результаты исследований по формированию активных элементов узких мезаполосковых лазеров с гребневидным волноводом в установке с источником ТСП, а также по энергетическому воздействию процесса на излучательные свойства обрабатываемых структур и долговечность приборов.

2. Методика эксперимента

Исследования производились на установке «ЭРА-2М», оснащённой источником ТСП, разработанным в НПП «Тирс» (Зеленоград). Принципиальная схема модернизированной установки представлена на рис.1. Источник, представляющий собой закрытую кварцевым колпаком катушку возбуждения плазмы, называемую в дальнейшем «антенной», крепится на коаксиальном охлаждаемом подводе ВЧ мощности на верхней крышке технологической камеры. Формируемая плазма является «последним витком» катушки возбуждения. Через антенну проходит герметичный оптический канал для пучка интерферометра на основе He–Ne-лазера, позволяющего контролировать глубину травления в ходе процесса. Охлаждаемый водой рабочий столик подключается к ВЧ генератору ($f = 13.56$ МГц) через согласующее устройство для независимого управления потенциалом смещения. Столик снабжён газораспределителем, равномерно-концентрически подающим смесь газов в рабочую область.

Данная установка не имела шлюзовой откачки, что

А.В.Зубанов, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Стегляма», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Поступила в редакцию 13 апреля 2004 г., после доработки – 8 октября 2004 г.

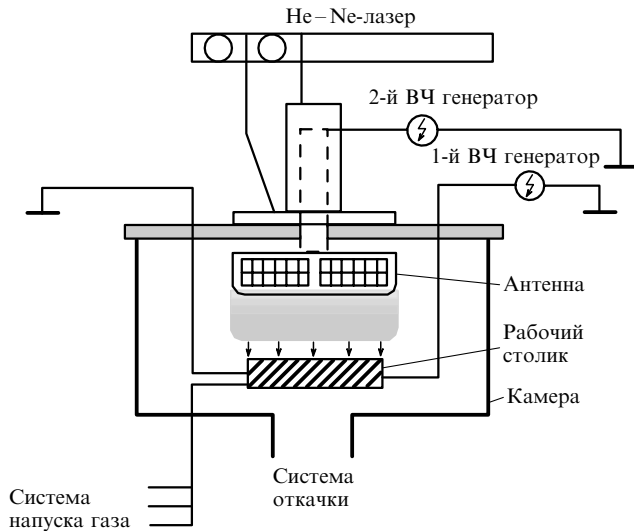


Рис.1. Принципиальная схема модифицированной рабочей камеры установки «ЭРА-2М» с источником ТСП.

полностью исключало возможность использования чистого Cl_2 . В то же время использование SiCl_4 позволяло обеспечить высокую воспроизводимость и скорость травления многослойных структур $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, а также избежать коррозионного разрушения оборудования.

Предварительные испытания установки с использованием SiCl_4 показали, что конструкция установки и источника обеспечивала стабильную работу в следующих режимах:

- Мощность источника ТСП в диапазоне 300–600 Вт (минимальное значение мощности ограничивалось возможностью поддержания разряда в камере, максимальной – используемым генератором).
- Мощность, подаваемая на стол, от 30 до 150 Вт.
- Давление в камере во время процесса травления в диапазоне $2 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-3}$ Тор (верхний предел лимитировалась стабильностью зажигания разряда, нижний – регулятором расхода и системой откачки).

Наиболее важные результаты технологических исследований представлены на рис.2. Установлено, что рост мощности в антенне приводит к снижению напряжения автосмещения, вызывая тем самым уменьшение скорости травления (рис.2,а). Вместе с тем можно отметить, что изменение мощности антенны не оказывает существенного влияния на геометрию гребня. При прочих равных условиях наклон боковых граней мезаполоски остаётся практически неизменным ($80-85^\circ$) и зависит, главным образом, от качества фоторезистивной маски (ФРМ).

Как и ожидалось, влияние мощности, подаваемой непосредственно на стол-мишень, является более существенным (рис.2,б). Увеличение мощности на столе приводит к росту напряжения автосмещения, вызывая, при прочих равных условиях, увеличение скорости удаления материала.

С учётом всего комплекса требований к процессу (воспроизводимость профиля гребня, зеркальность поверхности, селективность и скорость процесса и т.д.) был выбран режим обработки: скорость травления $V = 1450 \text{ \AA/мин}$, энергия частиц $E_{\text{ТСП}} = 150 \text{ эВ}$. В этом режиме в пределах рабочей области ($d = 150 \text{ мм}$) отклонение от средней глубины травления ($\sim 3 \text{ мкм}$) составляет всего

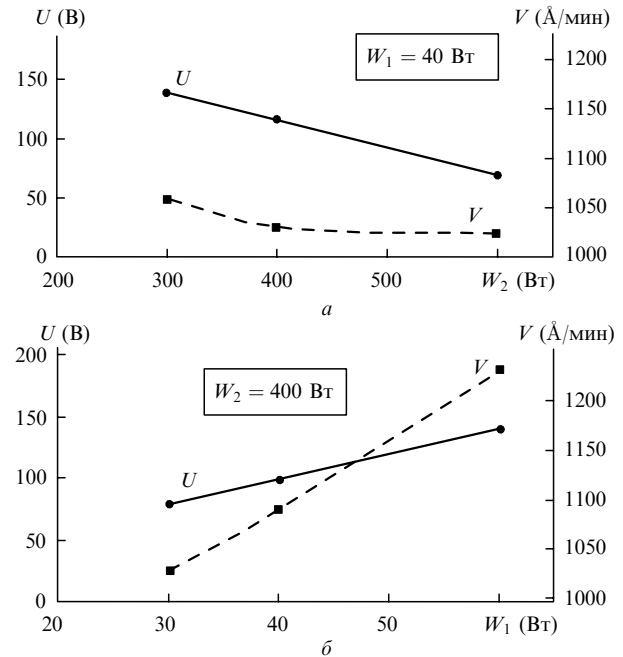


Рис.2. Зависимости напряжения смещения U и скорости травления V от ВЧ мощности в антенне W_2 при мощности на рабочем столе $W_1 = 40 \text{ Вт}$ (а) и от мощности на рабочем столе W_1 при мощности в антенне $W_2 = 400 \text{ Вт}$ (б).

$\pm 1.6\%$. Этот режим использовался во всех описанных ниже экспериментах.

3. Результаты экспериментов

Для оценки перспектив использования источника в технологии изготовления светозлучающих приборов были выполнены эксперименты по влиянию ионного воздействия на электрофизические свойства эпитаксиальной структуры. Для сравнения использовался режим травления с ВЧ источником при $E_{\text{hf}} = 650 \text{ эВ}$.

В первой серии экспериментов в качестве критерия оценки влияния ионного воздействия использована интенсивность фотolumинесценции (ИФЛ). Выбор метода объясняется его высокой чувствительностью и возможностью получения прямой информации о воздействии ИХТ на эпитаксиальные слои вблизи основания мезаполоски.

Образцами служили фрагменты эпитаксиальных структур, активные области которых находились между симметричными широкозонными слоями AlGaAs , моделирующими волноводные слои. Толщина верхнего волновода в первой серии экспериментов составляла 1500 \AA , во второй – 500 \AA . Преимущества такого образца перед обычно используемой подложкой очевидны: расстояние от источника фотolumинесценции (активной области в виде одиночной квантовой ямы) до поверхности определяется с высокой точностью, а поглощение излучения в широком волноводе существенно лишь при наличии радиационных дефектов.

При измерениях часть исследуемого образца перед травлением закрывалась ФРМ, другая же часть подвергалась ионному воздействию. В первой серии экспериментов травление проводилось в три этапа с последовательным приближением к активной области. На каждом этапе удалялся волноводный слой толщиной 400 \AA . После каждого процесса ФРМ удалялась и измерялась ИФЛ

в смежных областях. Вслед за этим определялось относительное изменение ИФЛ и проводился отжиг (при 430 °С), после чего измерения повторялись.

Результаты настоящих исследований нашли подробное отражение в статье [7], где проведен детальный анализ и сопоставлены данные, полученные для установок, работающих с различной энергией ионов. В данном контексте интересно отметить следующее.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что травление при низкой энергии ионов (150 эВ) незначительно (на 15 %) снижает ИФЛ (рис.3). Хотя, в конечном счете, обрабатываемая поверхность была приближена к активной области всего на 100 Å, дополнительный спад ИФЛ не наблюдался уже начиная с остаточной толщины эмиттера ~400 Å и величина ИФЛ оставалась на прежнем уровне (~85 % от исходного значения). В отличие от случая высокоэнергетичной обработки ($E > 500$ эВ) отжиг образцов не восстанавливает, а дополнительно снижает ИФЛ. В этой связи разумно предположить, что снижение ИФЛ обусловлено, скорее всего, влиянием поверхностных дефектов. Такие дефекты могут образовываться как непосредственно при ионном воздействии (вакансии As), так и при нагреве в результате химического взаимодействия поверхности с продуктами ИХТ, содержащими Si и Cl, а также с атмосферными газами.

Дополнительным подтверждением такой трактовки являются результаты низкоэнергетичной обработки образцов в инертных газах (Ar и Xe). При переносе образцов после обработки на воздух регистрировалось снижение ИФЛ на 18 %. Если же после обработки поверхность образцов покрывалась в том же вакуумном цикле плёнкой ZnSe (~0.3 мкм), то величина ИФЛ оставалась на первоначальном уровне.

Во второй серии экспериментов влияние энергии частиц на ИФЛ при ВЧ и ТСП-травлении изучалось на реальных светоизлучающих приборах. В качестве критерия было выбрано изменение мощности излучения в процессе электротермотренировки при постоянном токе накачки. Для исключения влияния на деградацию других факторов приборы изготавливались из половинок одних и тех же эпитаксиальных структур, а все технологические процессы (кроме ИХТ) по изготовлению излучателей были идентичными.

Режимы травления суперлюминесцентных диодов с гребневидным волноводом и косым полосковым контактом были теми же, что и в предыдущих опытах по ИФЛ,

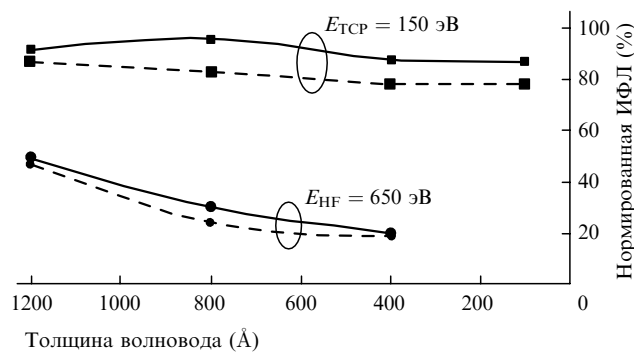


Рис.3. Изменение интенсивности фотолюминесценции I/I_0 из активной области при уменьшении толщины волновода h (I_0 – исходная ИФЛ до травления при толщине волновода 1500 Å). Штриховыми кривыми показано поведение ИФЛ после проведения высокотемпературного отжига.

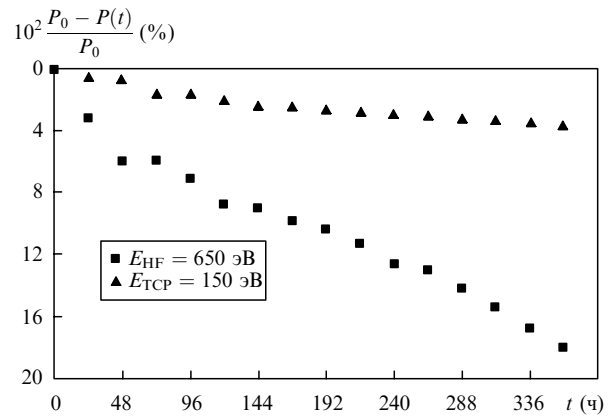


Рис.4. Результаты сравнительных испытаний деградации суперлюминесцентных диодов, изготовленных с помощью систем ВЧ (■) и ТСП (▲); P_0 – исходная мощность излучения.

т.е. $E_{НФ} = 650$ эВ и $E_{ТСП} = 150$ эВ. Режим работы диода при мощности излучения $P = 1.5 - 2.5$ мВт в опытах по деградации исключал вклад деградации призеркальных областей, но обеспечивал необходимую токовую нагрузку (90 мА). Температура при электротермотренировке составляла +55 °С. Методика тренировки и измерений была обычной. Усреднённые результаты сравнительных испытаний по измерению спада мощности $(1 - P(t)/P_0) \times 100$ % приведены на рис.4 для двух групп суперлюминесцентных диодов.

Для группы I ($E_{НФ} = 650$ эВ) расстояние h от поверхности до активной области было выбрано равным 0.3 мкм, в то время как у приборов группы II ($E_{ТСП} = 150$ эВ) эта величина составляла 0.23 мкм. Тем не менее налицо явное преимущество низкоэнергетичного травления. При общем среднем спаде мощности за 4 суток 1.75 % приборы II группы уже через 2 суток выходят на уровень спада 0.5 %, а ещё через 2 суток спад уменьшается до 0.15 %, что существенно превышает уровень требований к приборам этого класса.

Напротив, в аналогичных условиях приборы I группы деградировали с заметно большей скоростью – от 3.12 % в первые сутки до 2.1 % – 2.7 % в последующие 14 суток. При этом тенденция к уменьшению скорости деградации отсутствовала.

Резюмируя результаты обеих серий экспериментов, можно сделать следующие выводы:

- Наблюдается хорошая корреляция между уменьшением ИФЛ и скоростью деградации суперлюминесцентных диодов по мере увеличения энергии частиц при ИХТ. Это указывает на то, что за оба этих процесса ответственны дефекты, образовавшиеся в приповерхностном слое полупроводника.

- Процесс ионно-химического травления в ТСП-источнике с $E_{ТСП} = 150$ эВ, при котором нарушается тонкий приповерхностный слой, не оказывает существенного влияния на деградацию светоизлучающих приборов (по крайней мере при реально используемых расстояниях от травленной поверхности до активной области), и источник ТСП обладает явными преимуществами перед ВЧ системой.

4. Заключение

Использование источника ТСП позволяет обеспечить требуемую точность изготовления элементов в пределах

рабочей области ($d = 150$ мм) при одновременном росте скорости обработки поверхности (до 1300 Å/мин) и снижении энергии частиц. При этом сохраняется возможность получения качественной морфологии поверхности. Кроме того, источник ТСП позволяет изменять режимы травления и, следовательно, в широких пределах варьировать геометрию мезаполоски. Отметим также более высокую производительность ТСП-системы по сравнению с ВЧ системой, что обусловлено более высокой однородностью скорости травления в пределах рабочей зоны.

Важно отметить, что оптимальный режим травления при энергии ионов 150 – 160 эВ полностью отвечает требованиям к формированию высококачественного активного элемента с гребневидным волноводом [8] и позволяет при этом минимизировать радиационные нарушения поверхности, в результате чего снижается скорость деградации светоизлучающих приборов.

Авторы выражают благодарность главному инжене-

ру НПП «ТИРС» Е.В.Берлину за помощь в освоении источника ТСП, В.А.Акментину, Е.Н.Дранковой и Е.Н.Моховой – за помощь в изготовлении и испытании приборов.

1. Jost M., Bona G.L., Buchmann P., Sasso G., Vettiger P., Webb D. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (10), 696 (1990).
2. Asakawa K., Yoshikawa T., Kohmoto S., Nambu Y., Sugimoto Y. *Jap. J. Appl. Phys.*, **37**, 373 (1998).
3. Елисеев П.Г. В сб. «Надежность полупроводниковых материалов» (Итоги науки и техники. Сер. Электроника. М.: ВИНТИ, 1989, т.23, с.31).
4. Sugata S., Asakawa K. *J. Vac. Technol. B*, **6** (3), 876 (1988).
5. Pearton S.J., Hobson W.S. *Semicond. Sci. Technol.*, **6**, 948 (1991).
6. Horst S.C., Agarwala S., King O. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (11), 1444 (1997).
7. Зубанов А.В., Мармалюк А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Лазерные новости*, № 1-2, 65 (2002).
8. Давыдова Е.И., Зубанов А.В., Мармалюк А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Квантовая электроника*, **34** (9), 805 (2004).