

Изменение люминесцентных характеристик полупроводниковых гетероструктур при ионно-лучевом травлении

© Я.В. Левицкий, М.И. Митрофанов, Г.В. Вознюк, Д.Н. Николаев, М.Н. Мизеров, В.П. Евтихийев[†]

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

[†] E-mail: Evtikhiev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 22 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 11 мая 2019 г.

Принята к публикации 13 мая 2019 г.

Ионно-лучевое травление гетероструктур AlGaAs/GaAs приводит к возникновению радиационных дефектов и, как следствие, гашению люминесценции. Отжиг при 620°C в атмосфере As позволяет достичь практически полного восстановления квантовой эффективности люминесценции для случая радиационных дефектов, залегающих на расстоянии вплоть до 150 нм от гетерограницы.

Ключевые слова: сфокусированный ионный пучок, прямая ионная литография, нанолитография, радиационные дефекты, отжиг, микрофотолюминесценция.

DOI: 10.21883/FTP.2019.11.48459.9146

1. Введение

Существует несколько технологических методов для реализации трехмерных (3D) полупроводниковых элементов фотоники и нанoeлектроники: фотолитография [1], электронно-лучевая литография [2], литография сфокусированным ионным пучком (СИП) [3]. Среди этих методов травление СИП является наиболее гибким и доступным для исследований, разработок и прототипирования приборов. СИП обеспечивает прямую безмасочную литографию с высоким разрешением (~10 нм) без использования фоторезиста, позволяет изменять глубину травления *in situ*, варьируя экспозицию, чтобы быстро опробовать новые идеи конструкции. Метод травления сфокусированным ионным пучком зарекомендовал себя как перспективная технология прототипирования элементов интегральной электроники и фотоники, однако обычно используется для изготовления пассивных элементов [4] (дифракционных зеркал, фотонных кристаллов и т.п.). Фактором, который сильно ограничивает применение СИП, является сопутствующее радиационное повреждение кристаллической структуры. Формирование радиационных дефектов было подробно исследовано для взаимодействия с полупроводниками пучков высокоэнергетичных ионов (энергии $E > 100$ кэВ), используемых в процессе ионной имплантации [5–8]. Для процесса ионно-лучевого травления со значительно меньшими значениями энергии ионов (2–30 кэВ) и принципиально большей величиной тока сведения о люминесцентных свойствах структур, подвергнутых воздействию сфокусированного ионного пучка, в литературе практически отсутствуют.

2. Эксперимент

Для проведения измерений методом газотранспортной эпитаксии была выращена двойная гетероструктура

Al_{0.18}Ga_{0.82}As/GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As с толщиной каждого слоя 1 мкм. На поверхности гетероструктуры сфокусированным пучком ионов Ga⁺ было вытравлено 7 квадратов размером 50 × 50 мкм с глубинами 10, 150, 180, 330, 850, 1200 и 1500 нм (рис. 1, а). Для травления была использована сверхвысоковакуумная литографическая установка собственного изготовления, оснащенная ионной (COBRA) и электронной (e-CLIPSE Plus) пушками фирмы Orsay Physics. Энергия ионов Ga⁺ составляла 30 кэВ. Для предотвращения накопления Ga в процессе травления применялся газ-прекурсор XeF₂. Условия сверхвысокого вакуума обеспечивали отсутствие окисления в процессе травления. Для изучения влияния радиационных дефектов, возникающих в процессе травления, проводили измерения микрофотолюминесценции при комнатной температуре. Для возбуждения фотолюминесценции использовался твердотельный лазер с длиной волны излучения 671 нм, сфокусированный в пятно размером 10 мкм объективом с числовой апертурой NA 0.85, который использовался также и для сбора излучения фотолюминесценции. Плотность мощности фотовозбуждения составляла ~1 кВт/см². Распределение поглощенного излучения в гетероструктуре представлено на рис. 1, б. Для оценки поглощения на длине волны 671 нм использовались коэффициенты поглощения $1.29 \cdot 10^4$ см⁻¹ для GaAs и $1.33 \cdot 10^4$ см⁻¹ для Al_{0.18}Ga_{0.82}As. Интенсивность фотолюминесценции гетероструктуры оценивалась по площади спектров.

3. Результаты

На рис. 2 показаны спектры фотолюминесценции нетравленного участка образца и из первых 5 квадратов (глубина травления 10, 150, 180, 330 и 850 нм). Сигнал люминесценции из более глубоких квадратов не наблюдался. Во всех спектрах присутствует только пик, соответствующий краевому излучению GaAs

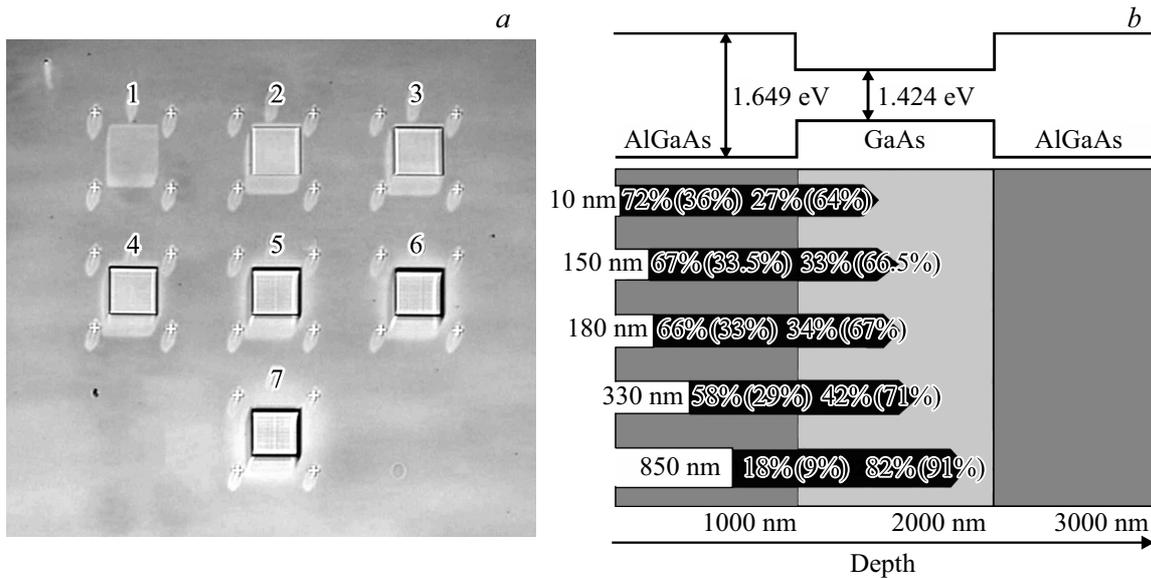


Рис. 1. Оптическое изображение травленных областей 1–7 (а) и схематическая зонная диаграмма гетероструктуры (b, сверху), распределение поглощенного излучения в гетероструктуре (b, внизу), в скобках — изменение процентной доли фотогенерированных электронно-дырочных пар в слоях AlGaAs и GaAs.

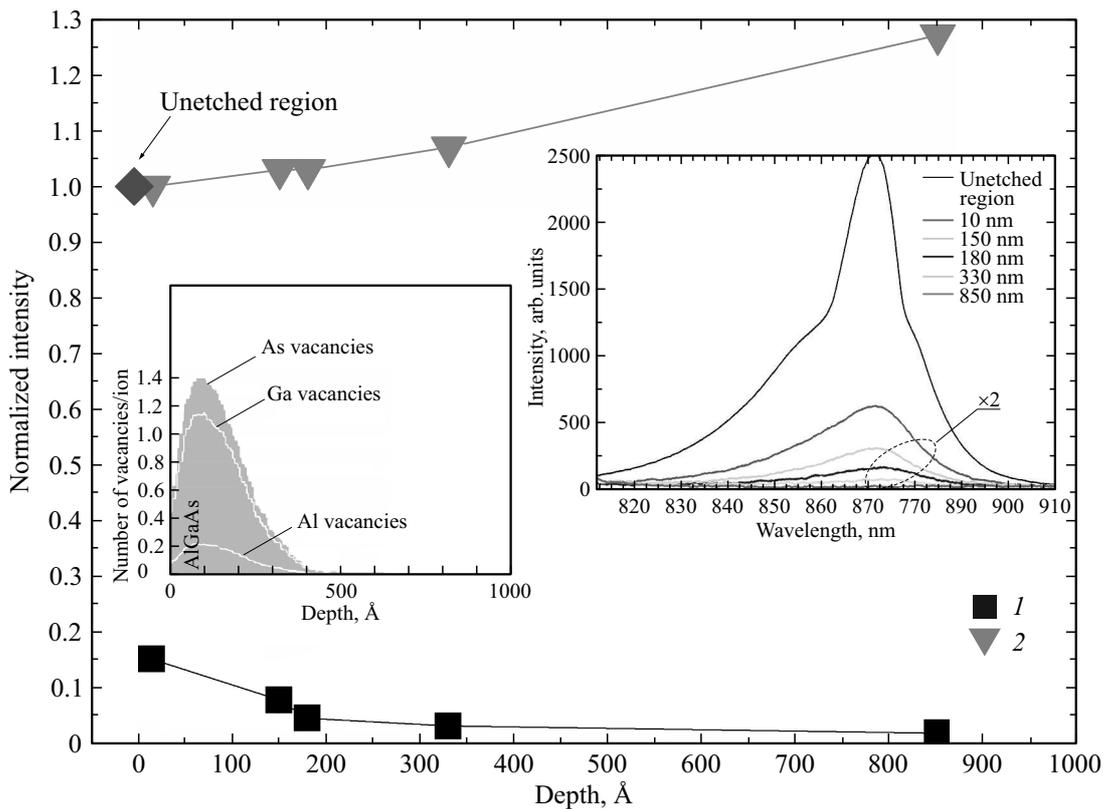


Рис. 2. Относительная интенсивность фотолюминесценции (*I*) из травленных областей, нормированная на интенсивность люминесценции из нетравленной области и изменение процентной доли фотогенерированных электронно-дырочных пар в слое GaAs (*2*). На вставках: справа — спектры микрофотолюминесценции, слева — профиль распределения вакансий согласно SRIM/TRIM.

активной области. Высокое качество гетероструктуры подтверждает узкое „плечо“ в спектре люминесценции нетравленной области, обусловленное стимулированной

люминесценцией. Точками *1* на рис. 2 показаны относительные значения интенсивности люминесценции из травленных квадратов, нормированные на интенсивность

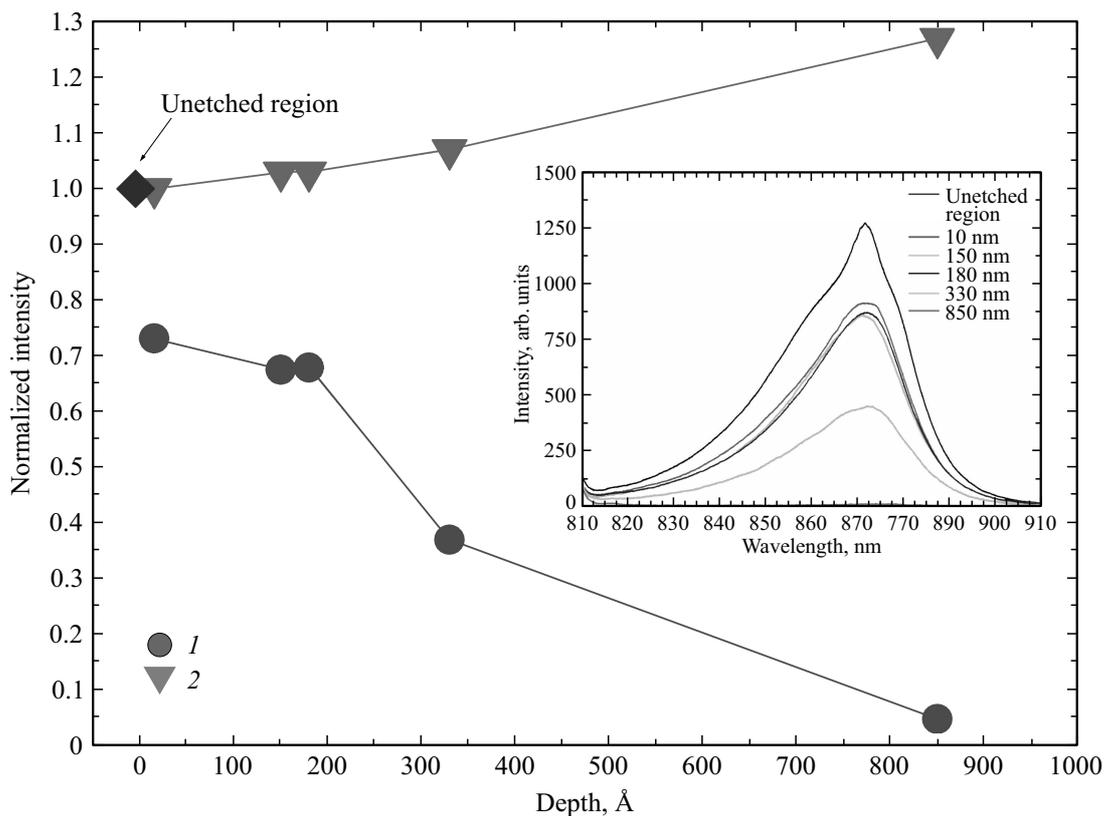


Рис. 3. Относительная интенсивность фотолюминесценции из травленных областей гетероструктуры после отжига при 300°C, нормированная на интенсивность люминесценции из нетравленной области (1) и изменение процентной доли фотогенерированных электронно-дырочных пар в слое GaAs (2). На вставке — спектры микрофотолюминесценции.

излучения нетравленного образца. Точками 2 показано изменение процентной доли фотогенерированных электронно-дырочных пар в слое GaAs. При расчете предполагалось, что из-за относительно большой длины диффузии половина неравновесных носителей, фотогенерированных в широкозонных слоях, попадает в активную область GaAs.

Обращает на себя внимание резкое падение интенсивности фотолюминесценции в травленных областях. Если в квадратах 1 и 2 с неглубоким травлением гашение люминесценции можно было бы объяснить возникновением аморфизованного поверхностного слоя, то травление до глубины 850 нм должно было бы вызвать только рост люминесценции. Очевидно, что полученный характер зависимости интенсивности люминесценции от глубины травления может быть объяснен накоплением радиационных дефектов в слоях гетероструктуры и соответствующим падением времени жизни неравновесных носителей из-за безызлучательной рекомбинации. Для этого мы провели расчеты с помощью одного из наиболее распространенных программных пакетов расчета взаимодействия высокоэнергетических ионов с твердым телом — SRIM/TRIM (рис. 2). В этом пакете использована модель каскадных столкновений. При расчетах использовались следующие параметры: энергия ионов Ga^+ 30 кэВ, материал мишени $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$, угол

падения ионного пучка 0°. Результаты расчета профилей распределения имплантированных атомов Ga, а также вакансий атомов Al, Ga и As в слое $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ показывают, что максимальная глубина формирования радиационных дефектов не превышает 100 нм. Эти данные не объясняют наблюдаемого гашения люминесценции. По всей видимости, программный пакет SRIM/TRIM не учитывает целый ряд эффектов, наблюдавшихся ранее при исследовании процесса ионной имплантации [5,7,9] — уменьшение энергии смещения атома в решетке в результате воздействия первичного иона, стимулированную диффузию вакансий и межузельных атомов, кластеризацию дефектов, а также влияние температуры.

Для восстановления кристаллического качества гетероструктуры были проведены отжиги при температуре 300°C в условиях сверхвысокого вакуума и при 620°C в парах As в течение 20 мин. Измерения фотолюминесценции показали (рис. 3), что отжиг при 300°C приводит лишь к частичному восстановлению люминесценции в квадратах с неглубоким травлением (10, 150, 180, 330 нм). Отжиг при температуре, близкой к температуре неконгруэнтного разложения GaAs (620°C), позволил практически полностью восстановить эффективность люминесценции из всех травленных областей вплоть до слоя GaAs (рис. 4). Анализ полученных результатов

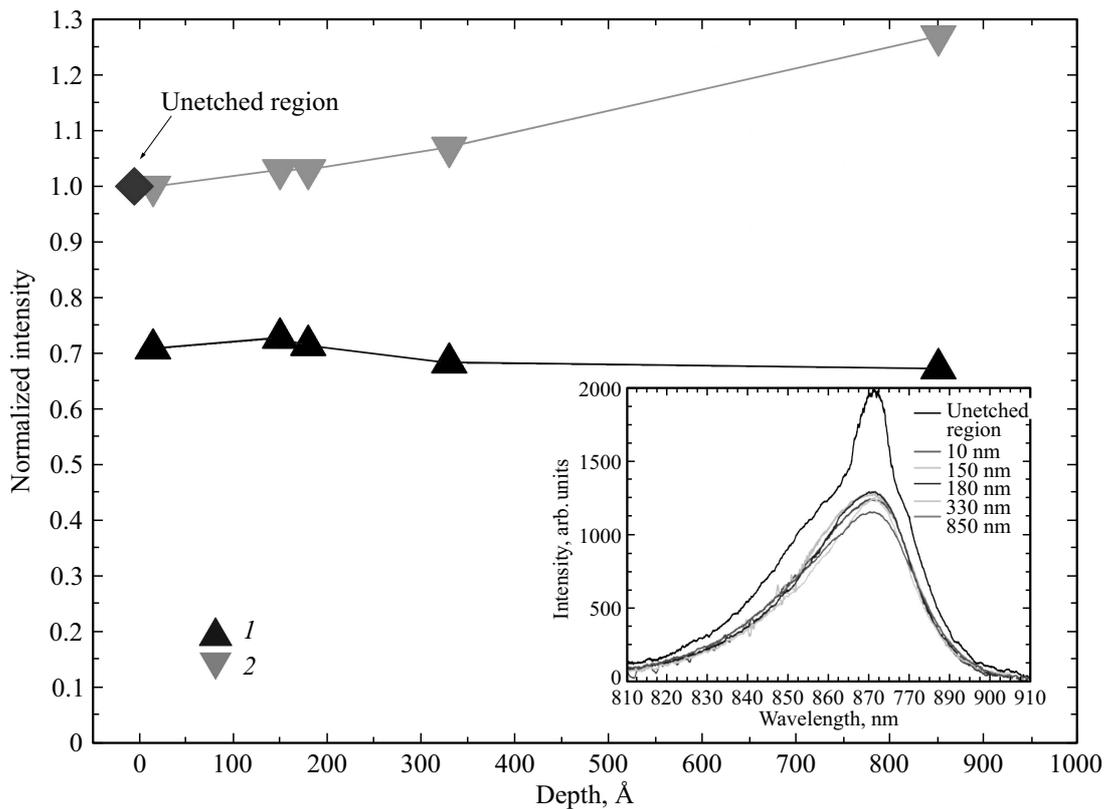


Рис. 4. Относительная интенсивность фотолюминесценции из травленных областей гетероструктуры после отжига при 620°C , нормированная на интенсивность люминесценции из нетравленной области (1) и изменение процентной доли фотогенерированных электронно-дырочных пар в слое GaAs (2). На вставке — спектры микрофотолюминесценции.

позволяет предположить, что в процессе ионно-лучевого травления происходит формирование радиационных дефектов и их диффузия в глубь структуры. Ионно-лучевое травление отличается от ранее изученного процесса ионной имплантации принципиально большими значениями плотности тока. Изучая влияние плотности ионного тока, авторы отмечали, что при одной и той же ионной дозе повреждений больше, если она набрана за малое количество экспозиций [5]. В этом случае накопление дефектов ведет к их кластеризации. Восстановление кластеризованных дефектов ожогом затруднено из-за большей энергии активации. По всей видимости, это обстоятельство и является причиной наблюдаемой разницы в результатах отжига при разных температурах.

4. Заключение

Ионно-лучевая литография сфокусированным ионным пучком в условиях сверхвысокого вакуума может быть доступным и мощным методом для исследований, разработок и прототипирования приборов нанoeлектроники и интегральной фотоники на основе гетероструктур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. При выборе режимов литографии необходимо учитывать не только энергию пучка, но и плотность тока, количество экспозиций, температуру образца. Отжиг травленных образцов двойной гетерострукту-

ры $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ при температуре $\sim 600^{\circ}\text{C}$ обеспечивает практически полное восстановление кристаллического совершенства для случая радиационных дефектов, залегающих на расстоянии вплоть до 150 нм от гетерограницы.

Финансирование работы

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (грант 16-12-10503).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С. Grivas. Optoelectron. Progr. Quant. Electron., **35**, 159 (2011).
- [2] M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.M. Nadtochiy, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.A. Bogdanov, Z.F. Sadrieva, A.E. Zhukov, A.A. Lipovskii, D.V. Karpov, J. Laukkanen, J. Tommila. Nanoscale Res. Lett., **9**, 657 (2014).
- [3] M. Mehta, D. Reuter, A. Wieck, S. Michaelis de Vasconcellos, A. Zrenner, C. Meier, Appl. Phys. Lett., **97**, 143101 (2010).

- [4] F. Vallini, D.S.L. Figueira, P.F. Jarschel, L.A.M. Barea, A.A.G. Von Zuben, N.C. Frateschi. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **27**, L25 (2009).
- [5] C.R. Musil, J. Melngailis, S. Etchin. *J. Appl. Phys.*, **80**, 3727 (1996).
- [6] H.H. Tan, C. Jagadish, J.S. Williams. *J. Appl. Phys.*, **80**, 2691 (1996).
- [7] U.V. Desnica. *J. Appl. Phys.*, **71**, 2591 (1992).
- [8] E. Wendler, N.A. Sobolev, A. Redondo-Cubero, K. Lorenz. *Phys. Status Solidi B*, **253** (11), 2099 (2016).
- [9] S. Rubanov, P.R. Munroe. *Microsc. Microanal.*, **11**, 446 (2005).

Редактор Л.В. Шаронова

The changes of semiconductor photoluminescence properties heterostructures after ion-beam etching

Ya.V. Levitskii, M.I. Mitrofanov, G.V. Voznyuk, D.N. Nikolayev, M.N. Mizerov, V.P. Evtikhiev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The ion-beam etching of AlGaAs/GaAs heterostructures leads to appearance of radiation defects and, as a result, to quenching of the photoluminescence. Annealing at 620°C in the presence of arsenic vapour makes it possible to achieve almost complete recovery of the quantum efficiency of the photoluminescence in the case of radiation defects arising at a distance up to 150 nm from the heterojunction.