

ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В *GaAs*, ОБЛУЧЕННОМ ПРОТОНАМИР.И. Д ж и о е в, А.Б. Ж у р а в л е в,
Е.Л. П о р т н о й, А.Н. Т и т к о в

Для генерации ультракоротких световых импульсов (УКИ) инжекционными гетеролазерами в режиме модуляции добротности требуется создать в активной области сверхбыстрый насыщающийся поглотитель (НП). В работе [1] эта задача была решена с помощью облучения одного из зеркал гетеролазера ионами кислорода с энергией $E \approx 18$ МэВ. В результате были получены УКИ длительностью менее 10 пс. Однако необходимость использовать в данном случае циклотрон для ускорения ионов до столь высокой энергии делает изготовление подобных пикосекундных гетеролазеров мало доступным.

Наиболее простым способом создания аналогичного НП является протонная бомбардировка, поскольку для стандартных полупроводниковых *AlGaAs* гетеролазеров с длиной резонатора $L \approx 200$ мкм для образования НП достаточно энергии протонов $E = 300-500$ кэВ. Протонный пучок с такими параметрами может быть получен на промышленных установках.

Быстродействие НП прямо зависит от времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в области НП. Проведенные недавно исследования [2] показали, что облучение кристаллов *GaAs* ионами кислорода приводит к уменьшению времени жизни ННЗ до величины $\tau \approx 10^{-12}$ при дозах облучения $\Phi \approx 10^{12}$ ион/см². Ускорение рекомбинации ННЗ определяется дефектами, возникающими вдоль треков имплантированных и вторичных ионов [3]. Эффективность НП обеспечивается при этом тем, что относительная доля поврежденного материала составляет не более нескольких процентов, и область НП сохраняет в основном свои оптические свойства. В частности, не меняется структура спектров фотолюминесценции, а уширение спектральных линий невелико.

Настоящая работа была предпринята с целью сравнения скорости рекомбинации ННЗ в *GaAs* после облучения ионами кислорода и протонами. Поскольку активные области гетеролазеров обладают низким уровнем легирования, сопоставление проводилось на относительно чистых эпитаксиальных пленках *p-GaAs*, легированных, как и в работе [2], примесью германия до уровня $4 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Образцы подвергались бомбардировке протонами с энергией 500 кэВ. В работе изучались спектры люминесценции образцов в диапазоне 0.7-2.4 мкм и определялись времена жизни неравновесных электронов. Как и в работе [2], малые значения времени жизни находились методом оптической ориентации [4, 5]. При этом

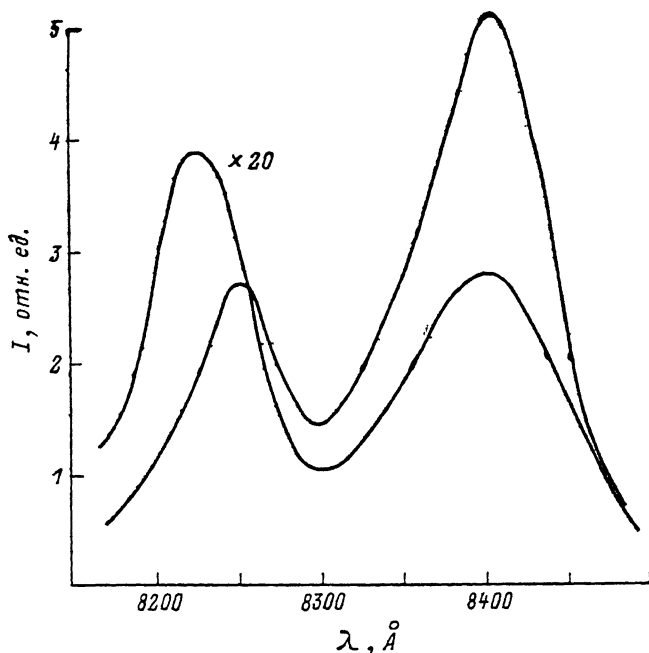


Рис. 1. Спектр люминесценции образцов *GaAs*; кривая 1 - до облучения; кривая 2 - после облучения протонами с дозой $\Phi = 5 \cdot 10^{10}$ ион/см².

анализировались поляризационные характеристики полосы люминесценции, отвечающей переходам зона - акцептор. Для возбуждения люминесценции использовался криптоновый лазер с длиной волны генерации 7525 Å.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции образцов до и после облучения дозой $5 \cdot 10^{10}$ ион/см². Спектры содержат две полосы излучения, обусловленными переходами зона - зона и зона акцептор. Переходы на глубокие уровни в спектрах не проявлялись ни до, ни после облучения кристаллов. Главное влияние облучения состояло в резком уменьшении интенсивности обеих полос люминесценции, что свидетельствует об уменьшении времен жизни неравновесных электронов.

Непосредственное измерение времен жизни показало, что если до облучения время жизни равнялось 10^{-8} с, то после облучения с дозой $\Phi = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻² оно уменьшилось до $6 \cdot 10^{-10}$ с. Значение времени жизни в необлученном образце близко к его оценке

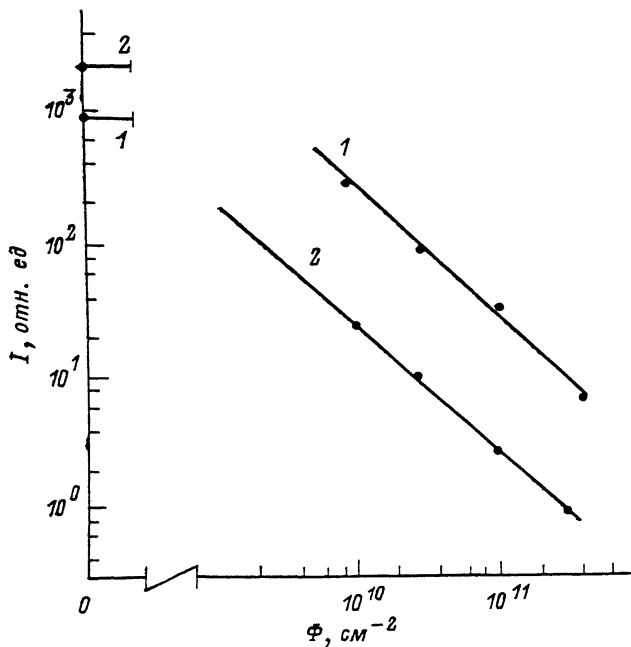


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности люминесценции от дозы облучения: кривая 1 - протоны, кривая 2 - ионы кислорода.

для излучательных переходов $1 - 3 \cdot 10^{-8}$ с [6]. Поэтому можно считать, что до облучения образца рекомбинация носила преимущественно излучательный характер. Уменьшение времени жизни с облучением говорит о введении канала безызлучательной рекомбинации, а достигнутое значение времени жизни определяет его эффективность. Непосредственное измерение времени жизни электронов в образцах с большими дозами облучения оказалось невозможным. Продолжившееся уменьшение интенсивности люминесценции и имевшаяся засветка приемника рассеянным светом лазера сильно затруднили анализ поляризационных характеристик полос люминесценции. Поэтому дальнейшее изменение времени жизни с облучением оценивалось по степени уменьшения интегральной интенсивности люминесценции. Как известно, при преобладании безызлучательной рекомбинации, что и достигается при облучении, концентрация неравновесных электронов в зоне и интенсивность люминесценции прямо пропорциональны времени жизни электронов.

Зависимость интегральной интенсивности люминесценции от уровня облучения исследовавшихся образцов приведена на рис. 2 (кривая 1). При ее построении учитывалась интенсивность только по-

полосы зона - акцептор. Такое выделение объясняется тем, что данная полоса не испытывает перепоглощения в кристалле, тогда как для межзонной полосы оно присутствует и могло бы вызвать искажение построенной зависимости. На существенность перепоглощения межзонной полосы указывает, в частности, наблюдаемое на рис. 1 ее относительное разгорание и коротковолновое смещение в спектре облученного образца. Эти изменения объясняются ослаблением перепоглощения.

Ход зависимости 1 на рис. 2 показывает, что время жизни электронов в образцах, облученных протонами с дозой $\Phi \approx 10^{12} \text{ см}^{-1}$, должно составлять $3 \cdot 10^{-11}$ с. Для сравнения на рис. 2 приведена также аналогичная зависимость (2) из работы [2] для образцов *GaAs*, облученных ионами кислорода.

Сопоставление непосредственно показывает относительную эффективность каналов безызлучательной рекомбинации, вводимых в обоих случаях. Из рис. 2 видно, что для достижения определенной величины времени жизни неравновесных носителей заряда в *GaAs* в случае облучения протонами требуется доза примерно на порядок больше, чем в случае облучения ионами кислорода.

В работе [7] из многочисленных испытаний имплантированных гетеролазеров сделан вывод, что оптимальная доза для получения УКИ наименьшей длительности в режиме модуляции добротности для стандартных гетеролазеров составляет величину $\Phi \approx 10^{12}$ ион/см² для ионов кислорода и $\Phi \approx 3 \cdot 10^{13}$ ион/см² для протонов, однако в случае протонно-имплантированных гетеролазеров минимальные длительности УКИ в среднем в 1.5 раза больше. Таким образом, прямая экстраполяция кривых 1 и 2 рис. 2 в области указанных доз не вполне правомерна, и простое увеличение дозы протонов не позволяет достичь ожидаемого результата, т.е. достичь при дозе $\Phi \approx 10^{13}$ ион/см² такого же быстродействия НП, как при дозе ионов кислорода $\Phi \approx 10^{12}$ ион/см². Это объясняется, по-видимому, тем, что при облучении протонами с $E=500$ кэВ создаются, в основном, точечные дефекты и при дозах $\Phi \approx 10^{13}$ ион/см² их количество таково, что начинает падать эффективность НП, т.е. начинают резко ухудшаться оптические свойства полупроводника. Преобладание точечных дефектов сказывается и на том, что насыщающийся поглотитель, созданный протонной бомбардировкой, гораздо быстрее теряет свои свойства вследствие большой подвижности точечных дефектов, поэтому пиковые гетеролазеры с таким НП менее долговечны.

В заключение авторы выражают свою благодарность В.А. Марушаку за проведение ряда измерений.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алферов Ж.И., Журавлев А.Б., Портной Е.Л., Стельмах Н.М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 18, С. 1093-1098.

- [2] Журавлев А.Б., Марушак В.А., Портной Е.Л., Стельмах Н.М., Титков А.Н. // ФТП 1988. Т. 22. В. 2. С. 352-354.
- [3] Ельяшевич И.А., Журавлев А.Б., Марахонов Ю.В., Портной Е.Л., Федорович А.Е // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 20. С. 1870-1875.
- [4] Fargous R.R. // Canad J. Phys. 1971. V. 49. N 17. P. 1850-1860.
- [5] Джигоев Р.И., Кавокин К.В., Флейшер В.Г. Труды У1 Республиканского коллоквиума по оптике и спектроскопии полупроводников и диэлектриков, Тбилиси, 1987, с. 38-41.
- [6] Гарбузов Д.З., Халфин В.Б. Эффективность и времена излучательных переходов в прямозонном полупроводнике типа *GaAs*. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Л., 1980. 54 с.
- [7] Портной Е.Л., Стельмах Н.М., Челноков А.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 11. С. 44-47.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
4 января 1990 г.