

ДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОЛАЗЕРА С НАСЫЩАЮЩИМСЯ ПОГЛОТИТЕЛЕМ, ПОЛУЧЕННЫМ ГЛУБОКОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ КИСЛОРОДА

Журавлев А. Б., Плявенок А. Г., Портной Е. Л.,
Сергеев В. Ф., Стельмах Н. М., Якубович С. Д.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования автомодуляционного или пиккового режима генерации гетеролазера с быстродействующим насыщающимся поглотителем, созданным с помощью облучения торца гетеролазера ионами высокой энергии. Показано, что уменьшение времени релаксации неравновесных носителей приводит к увеличению диапазона токов инжекции, при которых наблюдается автомодуляционный режим, и позволяет получить большие частоты следования (до 10 ГГц) и малые длительности (до 10 пс) оптических импульсов. Теоретическое рассмотрение сделано на основе анализа устойчивости стационарных решений системы балансных уравнений. Представленные экспериментальные данные и результаты машинного моделирования показывают хорошее согласие.

Инжекционные лазеры с управляемым нелинейным насыщающимся поглотителем обладают большими функциональными возможностями, чем обычные лазеры с однородным активным слоем, и в течение многих лет являются объектом детальных исследований [1-4]. Присущие им специфические режимы генерирования света представляют практический интерес для применения в оптических линиях связи, в метрологическом обеспечении измерений быстродействия полупроводниковых приборов и в других областях. Наиболее часто такие устройства реализуются в виде лазерного диода с монокристаллическим резонатором, содержащим два или более изолированных друг от друга участков инжекции. В работе [5] для создания неоднородной активной области использовалась протонная бомбардировка со стороны одного из зеркал собственного резонатора лазерного диода. За счет уменьшения времени жизни неравновесных носителей и уменьшения проводимости имплантированной области в активной среде лазера образуется область сильного поглощения. Размеры этой области определяются длиной торможения протонов в материале активной среды и составляют 5-13 мкм при энергии имплантации 300-500 кэВ [5]. Экспериментальные исследования лазеров такого типа показывают, что длительность генерируемого светового импульса лежит в пределах 30-70 пс [6].

Более короткие световые импульсы (около 10 пс) получены в инжекционных лазерах с насыщающимся поглотителем, создаваемым путем глубокой имплантации ионов кислорода в одно из зеркал лазерного диода [7]. Уменьшение длительности генерируемых импульсов авторы [7] связывают с существенным уменьшением времени релаксации неравновесных носителей заряда в насыщающемся поглотителе, полученном таким образом. Идея сверхбыстрого поглотителя состоит в пространственном разделении областей генерации и рекомбинации неосновных носителей заряда. Как показано в работе [8], в имплантированном ионами кислорода с высокой энергией *p*-GaAs время жизни неравновесных носителей составляет 3 пс при дозе облучения $\sim 10^{12}$ ион/см² и 30 пс при дозе $\sim 10^{11}$ ион/см².

В настоящей работе исследована динамика излучения гетеролазера с насыщающимся поглотителем, полученным имплантацией тяжелых ионов [7]. В эксперименте использовались полосковые AlGaAs-гетеролазеры, у которых

длина активной области L составляла ~ 200 мкм, длина волны излучения 830 мкм, пороговые токи в непрерывном режиме $70 \div 80$ мА. Время спонтанной рекомбинации исходного (неимплантированного) слоя τ_1 , по осциллографическим наблюдениям, составляет $1 \div 2$ нс. Облучение проводилось ионами O^{+++} с энергией 18.7 МэВ, глубина проникновения ионов $\sim 8 \div 10$ мкм.

Теоретический анализ динамики излучения был проделан на основе часто применяемой эмпирической модели излучательных переходов гетеролазеров [3]. Система балансных уравнений для нормированных электронных концентраций v_1 и v_2 на двух участках активного слоя лазера с относительными протяженностями $\gamma_1 = l_1/L$ и $\gamma_2 = l_2/L$ (l_1 — длина неимплантированного участка вдоль оси резонатора, l_2 — длина насыщающегося поглотителя, $L = l_1 + l_2$) и для нормированной интенсивности излучения R имеет вид

$$dv_1/dt = i - v_1 - R(1 + k \ln v_1), \quad (1)$$

$$dv_2/dt \approx c_i - v_2(\tau_1/\tau_2) - R(1 + k \ln v_2), \quad (2)$$

$$dR/dt = \{kR \ln(v_1^{j_1^{(0)}} - v_2^{j_2^{(0)}}) + q(\gamma_1 v_1 + \gamma_2 v_2)\}/\Omega, \quad (3)$$

где $i = j_1/j_n^{(0)}$, причем, так как $\gamma_2 \ll 1$, можно считать, что $i = J/J_n^{(0)}$ (j_1 — плотность тока инжекции на первом участке, $j_n^{(0)}$ и $j_n^{(0)}$ — пороговые плотность тока

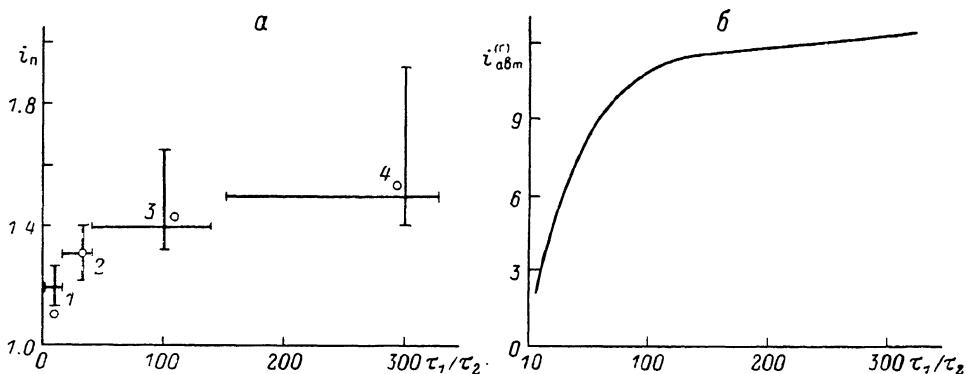


Рис. 1. Зависимости порогового тока (а) и верхней границы автомодуляции (б) от отношения времен τ_1/τ_2 для разных доз облучения.

Доза, ион/см²: 1 — $3 \cdot 10^{10}$, 2 — 10^{11} , 3 — $3 \cdot 10^{11}$, 4 — 10^{12} . $\gamma_1 = 0.95$, $\gamma_2 = 0.05$, $c = 0.1$; точки — теория.

и ток инжекции исходного однородного лазера); J — полный ток инжекции, $\tilde{t} = t/\tau_1$ (t — текущее время); Ω — отношение времени жизни фотонов в резонаторе к времени спонтанной рекомбинации τ_1 ; τ_2 — время релаксации носителей в насыщающемся поглотителе; q — коэффициент, характеризующий долю спонтанного излучения, попадающего в моды лазера; k — температурный фактор. В уравнении (2) принято, что эффективную нормированную плотность тока инжекции в насыщающемся поглотителе, которая определяется оптической и гальванической связью между участками лазера, можно приближенно представить в виде $c \cdot i$, где $c = \text{const}$. Аналитические выражения нормированных величин v_1 , v_2 , R , а также коэффициента k приведены в [3]. Теоретическое исследование системы уравнений (1)—(3) проведено при следующих типичных и взятых из эксперимента параметрах: $\gamma_1 = 0.95$, $\gamma_2 = 0.05$, $\Omega = 2.5 \cdot 10^{-3}$, $q = 10^{-4}$, $k = 1.5$, $\tau_1 = 1$ нс.

Для определения возможных состояний рассматриваемых гетеролазеров и для оценки значения коэффициента c проанализируем устойчивость стационарных решений системы (1)—(3). Этот анализ показывает, что поле переменных i , c разбивается характеристическими кривыми на области, соответствующие «гладкому» устойчивому режиму генерирования и автомодуляционному или пиковому режиму генерирования лазера. Уменьшение времени релаксации в насыщающемся поглотителе τ_2 приводит к сильному увеличению диапазона значений тока инжекции, при которых наблюдается пиковый режим генерирования.

В эксперименте пиковый режим контролировался прежде всего осциллографическим методом с использованием стробоскопического осциллографа С1-91/4 и быстродействующего фотоприемника с временным разрешением 100 пс. Регистрировались изменения порогового тока по сравнению со значением для

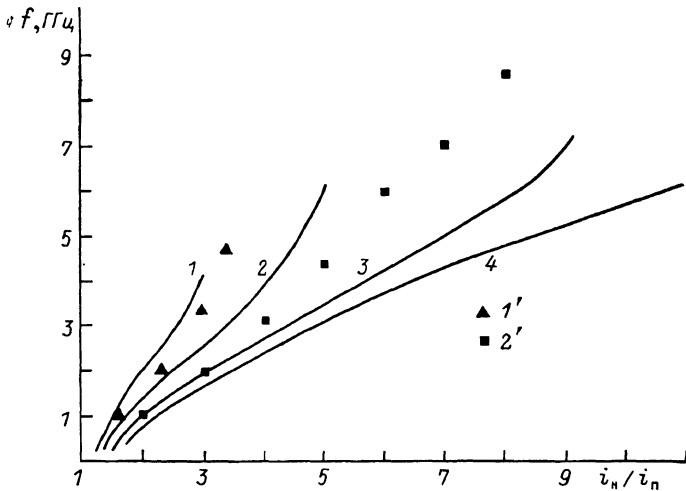


Рис. 2. Зависимость частоты повторения излучаемых импульсов f от величины превышения тока накачки лазера над порогом генерации для разных времен релаксации насыщающегося поглотителя.

τ_2 , пс: 1 — 100, 2 — 40, 3 — 10, 4 — 1; сплошные кривые — теория, точки — эксперимент для разных доз доза, ион/см²: 1' — 10¹¹, 2' — 10¹². $\gamma_1=0.95$, $\gamma_2=0.05$, $c=0.1$.

неимплантированного лазера i_n , изменение верхней границы области автомодуляции по току инжекции $i_{авт}^{(r)}$ в зависимости от дозы облучения, частота следования оптических импульсов в зависимости от превышения над порогом, время установления пикового режима. Результаты теоретических и эксперименталь-

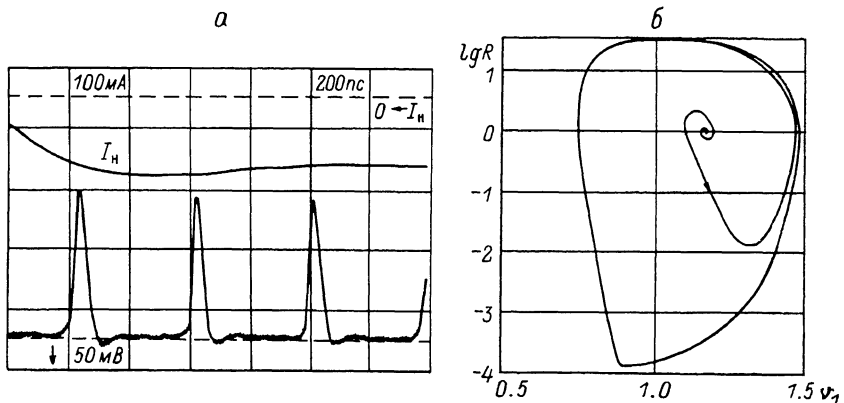


Рис. 3. Осциллограмма (а) и фазовый портрет (б), демонстрирующие весьма малое время переходного процесса установления автомодуляционного режима.

$E=18.7$ мэВ, $\varphi=3 \cdot 10^{11}$.

ных исследований зависимости i_n и $i_{авт}^{(r)}$ от дозы облучения (и, следовательно, от τ_2) представлены на рис. 1, а, б. Для коэффициента c здесь и в дальнейшем выбрано значение 0.1. Наблюдается удовлетворительное качественное согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными. Несколько большее увеличение порогового тока в эксперименте объясняется, по-видимому, неконтролируемым разбросом величин γ_1 и γ_2 , возможным изменением коэффициента c в зависимости от дозы облучения и вкладом в собственные оптические потери поглощения на аморфизированных областях. Столь малое изменение

порогового тока и столь большое изменение $i_{\text{авт}}^{(r)}$ при большом изменении времени релаксации поглотителя являются интересными особенностями гетеролазера с насыщающимся поглотителем, полученным имплантацией ионов кислорода.

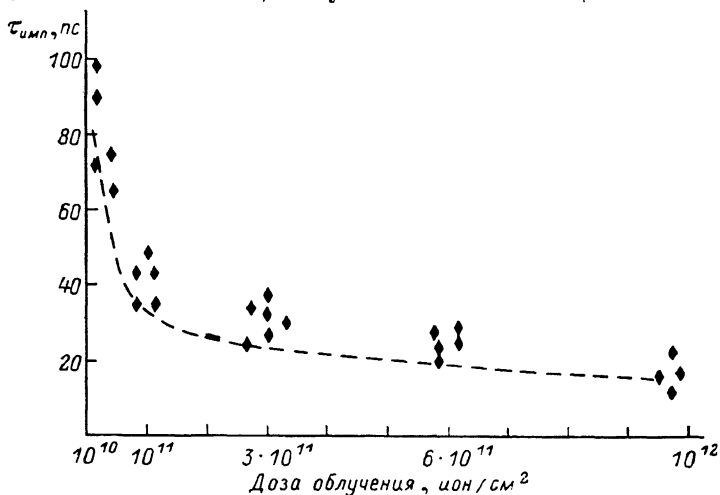


Рис. 4. Зависимость длительности излучаемых световых импульсов от дозы облучения.
Штриховая кривая — теория.

Кроме того, уменьшение времени τ_2 приводит к увеличению частотного диапазона пульсаций. На рис. 2 показаны возможность получения частот повторения световых импульсов вплоть до 10 ГГц при 7–10-кратном превышении порога неймплантированного лазера и возможность управления зависимостью частоты повторения импульсов от величины i изменением времени τ_2 (изменением дозы

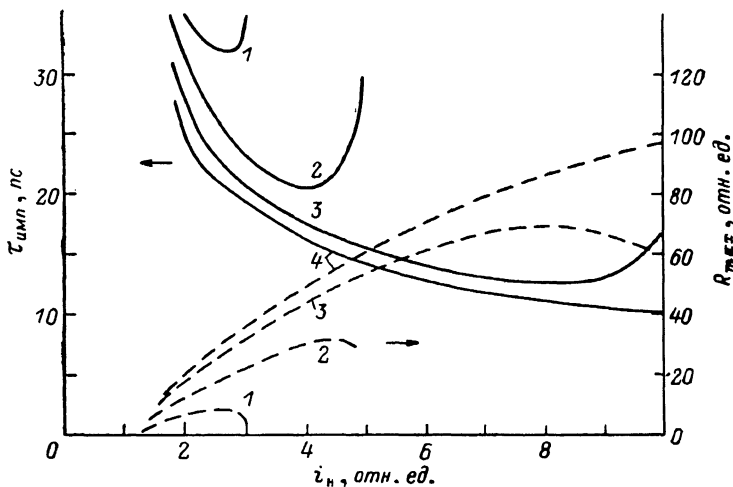


Рис. 5. Теоретические зависимости длительности генерируемых импульсов (сплошные кривые) и их мощности (штриховые) от величины превышения над порогом.

$\tau_{\text{имп}}$, пс: 1 — 100, 2 — 40, 3 — 10, 4 — 1.

облучения). Осциллографическое наблюдение процесса установления пикового режима (рис. 3) и анализ соответствующего фазового портрета указывают на дополнительную особенность лазера рассматриваемого типа. В отличие от традиционного двухкомпонентного лазера [4] он обладает весьма малой длительностью переходного процесса установления автомодуляционного режима (практически уже второй импульс имеет «стационарные» параметры).

При измерении длительности генерируемых импульсов применялась автокорреляционная методика, использующая квазиколлинеарную схему ГВГ

с двойной модуляцией пропускания плеч модифицированного интерферометра Майкельсона. Временное разрешение схемы определялось эффективной областью взаимодействия световых пучков и, по оценкам, составляло $0.5 \div 1.0$ пс. Измерения длительности проводились при токах, соответствующих среднему значению между нижней и верхней границами области автомодуляции. Как и ожидалось, уменьшение времени τ_2 привело к значительному уменьшению длительности генерируемых импульсов. На некоторых образцах получены импульсы длительностью ~ 10 пс. Зависимость длительности световых импульсов от дозы облучения представлена на рис. 4. На рис. 5, а, б изображены теоретические зависимости длительности импульсов $\tau_{\text{имп}}$ и нормированной пиковой мощности R_{max} от i при различных временах τ_2 . Для оценок можно считать, что у лазеров данного типа величина $R_{\text{max}}=1$ соответствует выходной мощности ~ 10 мВт.

Представленные экспериментальные данные и результаты машинного моделирования показывают хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие, что говорит о том, что использованная схема расчета может с пользой применяться при разработке и оптимизации параметров подобных лазеров.

Высокие технические характеристики и простота изготовления являются очевидным преимуществом полупроводниковых лазеров с насыщающимся поглотителем, полученным глубокой имплантацией тяжелых ионов. Использование подобных приборов в оптических системах обработки информации, требующих малой длительности световых импульсов, представляется особенно перспективным.

Л и т е р а т у р а

- [1] Lasher G. J. — Sol. St. Electron., 1964, v. 7, p. 707—715.
- [2] Басов Н. С., Никитин В. В., Семенов А. С. — УФН, 1969, т. 97, в. 4, с. 561—600.
- [3] Ривлин Л. А., Семенов А. Т., Якубович С. Д. Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров. М., 1983.
- [4] Голдобин И. С., Лукьянов В. Н., Солодков А. Ф., Якубович С. Д. — Квант. электрон., 1985, т. 12, в. 5, с. 953—958.
- [5] Van der Ziel J. P., Tsang W. T., Logan R. A., Augustyniak W. M. — Appl. Phys. Lett., 1981, v. 39, p. 376—378.
- [6] Kuznetsov M., Tsang D. Z., Walpole J. N., Rian Z. L., Ippen E. P. — Appl. Phys. Lett., 1987, v. 51, N 12, p. 895—897.
- [7] Алфёров Ж. И., Журавлев А. Б., Портной Е. Л., Стельмах Н. М. — Письма ЖТФ, 1987, т. 12, в. 18, с. 1093—1098.
- [8] Журавлев А. Б., Морущак В. А., Портной Е. Л., Стельмах Н. М., Титков А. Н. — ФТП, 1988, т. 22, в. 2, с. 352—354.