

06;07;10;12

## **Пикосекундные полупроводниковые лазеры с многосекционным насыщающимся поглотителем, созданные имплантацией тяжелых ионов**

© Г.Б. Венус, И.М. Гаджиев, А.Е. Губенко,  
Н.Д. Ильинская, Е.Л. Портной

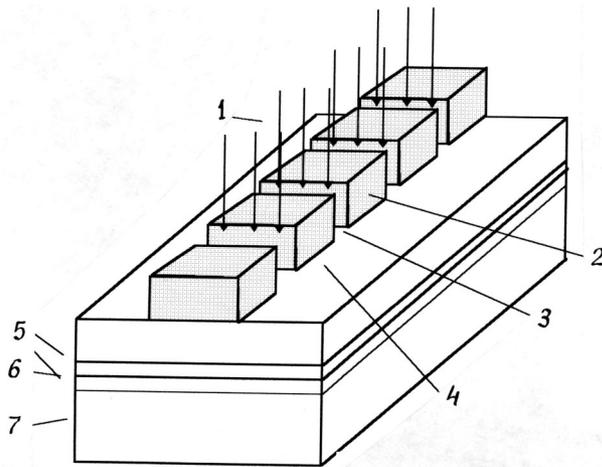
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 30 марта 1999 г.

Разработана методика проведения имплантаций высокоэнергетичными тяжелыми ионами через эмиттерный слой полупроводникового лазера, предназначенная для создания распределенных областей сверхбыстродействующего насыщающегося поглотителя, интегрированных в резонатор  $QW$ -лазера. На основе этой методики были созданы пикосекундные лазерные диоды повышенной средней мощности и продемонстрирована работа диодного лазера в режиме синхронизации мод на сталкивающихся импульсах с многосекционным насыщающимся поглотителем.

В последние годы достигнуты значительные успехи в области генерации мощных пикосекундных импульсов полупроводниковыми лазерами [1–3]. Однако средняя мощность таких приборов не превышает 0.5 мW и ограничена их высокими импульсными пороговыми токами. В данной работе нами рассматривается новый метод проведения имплантаций высокоэнергетичными тяжелыми ионами через эмиттерный слой полупроводникового лазера, ориентированный на создание пикосекундных лазеров на основе  $QW$ -структур, работающих в режиме модуляции добротности и синхронизации мод с высокой средней мощностью.

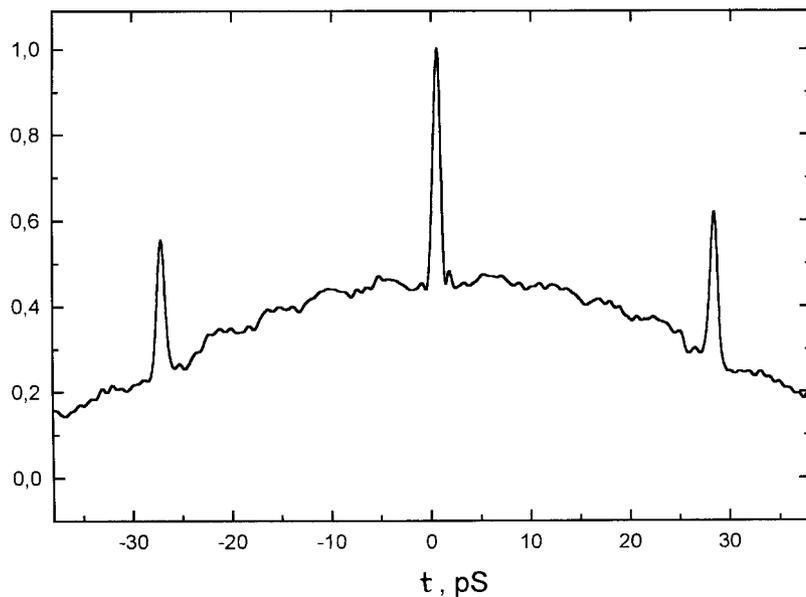
Как было показано в наших прошлых исследованиях, облучение полупроводниковых материалов высокоэнергетичными тяжелыми ионами позволяет получить высококачественный оптический материал со сверхмалыми временами жизни неравновесных носителей. Эти времена не превышают нескольких пикосекунд при дозах облучения выше  $10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> [4]. По своим свойствам полупроводниковые материалы, облученные высокоэнергетичными тяжелыми ионами, подобны  $LT$ -GaAs и



**Рис. 1.** InGaAs-лазер с распределенными областями насыщающегося поглотителя, интегрированными в его резонатор методом имплантации высокоэнергетических ионов через верхний эмиттерный слой: 1 — имплантация тяжелыми ионами для создания насыщающегося поглотителя. Ионы Ag — 7 MeV, дозы  $5 \cdot 10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 2 — имплантационная маска, толщина  $10 \mu\text{m}$ ; 3 — области насыщающегося поглотителя (размер  $20 \mu\text{m}$ ); 4 — пять областей усиления (размер  $200 \mu\text{m}$ ); 5 — AlGaAs; 6 — QW-InGaAs; 7 — n-GaAs.

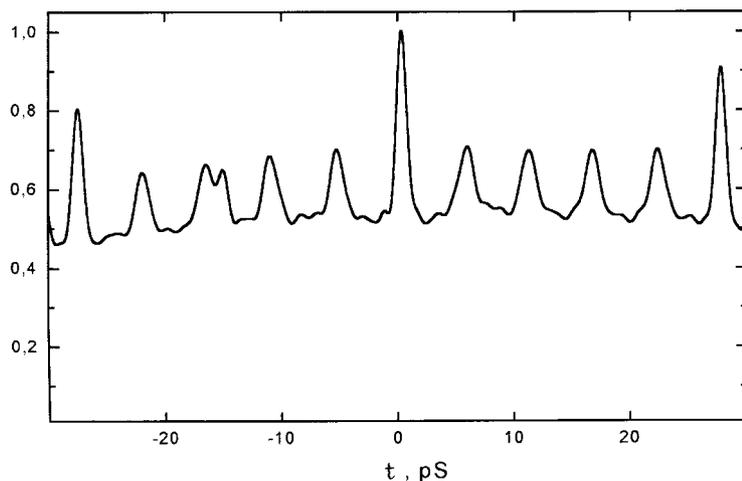
могут быть использованы как для создания насыщающегося поглотителя полупроводниковых лазеров, так и для создания сверхбыстродействующих фотоприемников [5].

Создание насыщающегося поглотителя путем имплантации зеркал полупроводниковых лазеров ионами с энергиями до 70–80 MeV позволяет получить высокоэффективный режим модуляции добротности для полупроводниковых лазеров на основе двойных [6] и одинарных гетероструктур [2]. В случае лазеров с квантово-размерной активной областью введение области насыщающегося поглотителя в район зеркал лазера не позволяет достигнуть достаточной глубины модуляции поглощения вследствие малости Г-фактора и большого значения остаточных потерь в резонаторе при повышенных дозах облучения. Увеличение эффективной модуляции поглощения QW-структур возможно путем распределения областей насыщающегося поглотителя внутри резонатора



**Рис. 2.** Автокорреляционная функция пикосекундного импульса InGaAs-лазера с многосекционным насыщающимся поглотителем, имплантированного ионами  $N^{3+}$  (5,6 MeV) с дозой  $10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>.

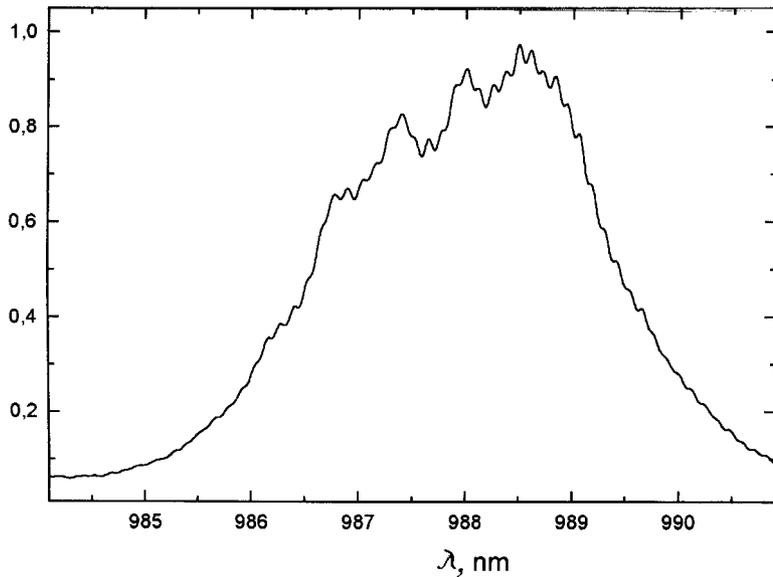
лазера диода. Для этой цели нами был разработан метод проведения имплантации высокоэнергетичными тяжелыми ионами сверху через эмиттерную область лазера (рис. 1). При такой геометрии облучения необходимая энергия ионов (N, Ar, Kr) лежит в пределах 2–8 MeV в зависимости от толщины слоев лазерной структуры. Экспериментально было показано, что такой энергии достаточно для формирования областей высокоэффективного насыщающегося поглотителя, устойчивого к оптическому отжигу. Для защиты неимплантируемых областей лазера нами были рассчитаны и созданы маски на основе гальванически осажденного золота (толщина 1,5–6  $\mu\text{m}$ ) и на основе толстых слоев фоторезиста (толщина 4–16  $\mu\text{m}$ ). Использование фотолитографических защитных масок с характерными размерами до 2–3  $\mu\text{m}$  предоставляет новые возможности как в выборе конструкции пикосекундного лазера в



**Рис. 3.** Автокорреляционная функция излучения InGaAs-лазера с многосекционным насыщающимся поглотителем (ионы  $N^{3+}$ , 5.6 MeV, доза  $10^{12}$  ion/cm $^2$ ) в режиме синхронизации мод на сталкивающихся импульсах с многосекционным насыщающимся поглотителем.

целом, так и в изменении параметров отдельных частей внутри области сверхбыстродействующего насыщающегося поглотителя.

Для демонстрации возможностей нового метода нами были использованы полосковые InGaAs-лазеры с напряженной  $QW$ -областью и длиной волны генерации в районе  $0.98 \mu m$ . Облучение структуры проводилось ионами  $N^{3+}$  (5.6 MeV, доза  $10^{11}$  ion/cm $^2$ ) через сегментированную фоторезистивную маску толщиной  $6 \mu m$  (рис. 1). Лазеры имели длину резонатора  $1100 \mu m$ , который состоял из пяти усиливающих секций длиной  $200 \mu m$ , разделенных областями насыщающегося поглотителя размером  $20 \mu m$ . При их накачке импульсами тока длительностью 1.5 ns и амплитудой 0.80–0.95 А были получены одиночные оптические импульсы с длительностью 43–45 ps и энергией 55–58 pJ (рис. 2). Такая величина энергии пикосекундного импульса является очень хорошим показателем для низкочастотных  $QW$ -лазеров, что сделало возможным создание источника пикосекундных оптических импульсов со средней мощностью 1.1 mW и частотой повторения импульсов 20 MHz. Ма-



**Рис. 4.** Спектр генерации InGaAs-лазера с многосекционным насыщающимся поглотителем (ионы  $N^{3+}$ , 5.6 MeV, доза  $10^{12}$  ion/cm $^2$ ) в режиме синхронизации мод на сталкивающихся импульсах с многосекционным насыщающимся поглотителем.

лая длительность оптического импульса по сравнению с величиной ground-trip лазера ( $\tau_{opt}/t_{rt} \approx 1.6-1.7$ ) указывает на высокую эффективность работы многосекционного насыщающегося поглотителя в режиме модуляции добротности. Такая эффективность работы, с нашей точки зрения, может быть связана не только с высоким оптическим качеством материала имплантированных областей, но также с процессами коррелированного вскрытия этих областей. На это обстоятельство указывают особенности на автокорреляционной кривой оптического импульса (рис. 2).

С увеличением дозы облучения до значений  $10^{12}$  ion/cm $^2$  коррелированное вскрытие насыщающегося поглотителя и уменьшение времен жизни неравновесных носителей в этих областях приводят к переходу работы лазера в режим синхронизации мод на сталкивающихся

импульсах с многосекционным насыщающимся поглотителем, впервые описанному в [7]. Как видно из автокорреляционной кривой (рис. 3), в данном режиме лазер генерирует импульсы длительностью порядка 1 ps с частотой повторения 180 GHz, которая в 5 раз выше собственной частоты лазерного резонатора. Наличие сверхвысокочастотной модуляции излучения лазерного диода также отчетливо прослеживается в его спектре излучения (рис. 4). Возможность дальнейшего повышения частоты генерации и простота лазера описываемой конструкции, по сравнению с лазерами с обратно-смещенными секциями насыщающегося поглотителя [7], указывает на перспективность применения имплантационного метода в области терагерцовой оптоэлектроники.

## Список литературы

- [1] *Zhu B., White I.H., Williams K.A., Laughton F.R.* // IEEE Photonics Technology letters. 1996. V. 8. P. 503–505.
- [2] *Portnoi E.L., Venus G.B., Khazan A.A., Gadjiev I.M., Shmarcev A.Yu., Frahm J., Kuhl D.* // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 1997. V. 3. N 2. P. 256–260.
- [3] *Stelmakh N., Lourtioz J.N., Marquebielle G., Hirtz J.P.* // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 1997. V. 3. N 2. P. 245–249.
- [4] *Аврутин Е., Портной М.* // ФТП. 1988. В. 22. С. 1524–1526.
- [5] *Bottcher E.H., Droge E., Bimberg D., Kuhl D., Frahm J., Venus G.B., Portnoi E.L.* // LEOS'97. 10th Annual Meeting. 1997. V. 2. P. 319–20.
- [6] *Portnoi E., Avrutin E., Chelnokov A.V.* Joint Soviet–American Workshop on the Physics of Semiconductor Lasers, Leningrad, 1991. New York: American Institute of Physics. P. 58–66.
- [7] *Martins-Filho J.F., Avrutin E.A., Ironside C.N., Roberts J.S.* // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. June 1995. V. 1. N 2. P. 539–551.