

Терагерцовые инжекционные лазеры на основе твердого раствора PbSnSe с длиной волны излучения до 46.5 мкм

© К.В. Маремьянин^{+,*}, В.В. Румянцев^{+,*}, А.В. Иконников^{+,*}, Л.С. Бовкун⁺,
Е.Г. Чижевский[‡], И.И. Засавицкий[‡], В.И. Гавриленко^{+,*}

⁺ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

^{*} Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

[‡] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

E-mail: kirillm@ipmras.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

На основе твердого раствора $Pb_{1-x}Sn_xSe$ созданы диффузионные инжекционные лазеры, излучающие в зависимости от состава и температуры в широкой области спектра 10–46.5 мкм. Разработана технология выращивания качественных монокристаллов из паровой фазы в условиях свободного роста. Исследованы зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки и спектры излучения инжекционных лазеров на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$. В данных образцах получена лазерная генерация длинноволнового излучения вплоть до рекордной длины волны 46.5 мкм.

1. Введение

В настоящее время во многих исследовательских центрах активно ведутся работы по созданию полупроводниковых источников излучения в терагерцовом диапазоне частот. Терагерцовый бум, охвативший научные группы в различных странах мира, обусловлен перспективами широких практических приложений терагерцового (ТГц) излучения. Особое практическое значение имеют полупроводниковые инжекционные лазеры, обладающие относительно узкой линией излучения и широким интервалом перестройки частоты генерации, что в сочетании с экономичностью питания и малыми габаритами лазеров позволило осуществить ряд важных применений. Однако в обсуждаемой области электромагнитного спектра с точки зрения инжекционных лазеров имеется пробел, который условно находится на стыке средней и дальней инфракрасных областей спектра, его можно также условно обозначить как 20–70 мкм (15–4 ТГц).

Наиболее значительные результаты в этом направлении достигнуты с использованием квантовых каскадных лазеров, которые работают в широком спектральном диапазоне 2.5–250 мкм, но имеется спектральное окно 24–67 мкм (12.5–4.5 ТГц), где квантовые каскадные лазеры не работают. Коротковолновая граница этой „запрещенной зоны генерации квантовых каскадных лазеров“ обусловлена близостью полосы остаточных лучей в используемых материалах GaInAs/AlInAs и GaAs/AlGaAs, где сильно решеточное поглощение. Следовательно, для разработки квантовых каскадных лазеров необходимы материалы с другими значениями энергии фононов. Поиски таких гетероструктур пока не увенчались успехом.

С другой стороны, классические диодные лазеры практически не разрабатывались для области спектра > 20 мкм. Были лишь одиночные достижения на длинах волн 26 мкм без магнитного поля и 31 мкм с магнитным

полем [1], 40 мкм [2–4] и 46 мкм [5]. Во всех случаях материалом служил твердый раствор $Pb_{1-x}Sn_xSe$. Кроме того, проводились подробные исследования интегральной интенсивности фотолюминесценции эпитаксиальных слоев твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ [6] и $Pb_{1-x}Sn_xSe$ [7] в зависимости от состава, концентрации носителей заряда, температуры и магнитного поля. Было показано, что интенсивность фотолюминесценции в обоих материалах резко падает в области энергий < 40–50 мэВ и граница спада зависит от концентрации носителей заряда, т. е. от близости частоты излучения и плазменной частоты в материале. Кроме того, было показано, что преимуществом обладает твердый раствор $Pb_{1-x}Sn_xSe$, поскольку в сильно анизотропном твердом растворе $Pb_{1-x}Sn_xTe$ имеет место безызлучательная междолинная оже-рекомбинация. Также в работе [8] было показано, что спектры излучения диодных лазеров $Pb_{1-x}Sn_xSe$ перестраиваются с температурой ($T = 18–80$ К) в широких пределах, что позволяет перекрыть диапазон длин волн от 11.5 до 44 мкм, а также было продемонстрировано использование данных лазеров в магнитоспектроскопии полупроводниковых структур.

Целью данной работы являлось получение лазерной генерации в дальней инфракрасной области спектра вплоть до длины волны излучения, рекордной по диффузионным лазерам на основе твердого раствора $Pb_{1-x}Sn_xSe$. Исследованы зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки и спектры излучения инжекционных лазеров на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$.

2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

В данной работе исследовались инжекционные полупроводниковые лазеры на основе твердых растворов

$Pb_{1-x}Sn_xSe$, работающие в импульсном режиме. Для получения генерации излучения в терагерцовой области нами был выбран твердый раствор $Pb_{1-x}Sn_xSe$, который обладает рядом преимуществ по сравнению с твердым раствором $Pb_{1-x}Sn_xTe$, а именно он отличается небольшим (~ 2) коэффициентом анизотропии, что важно для снижения междолинной рекомбинации при повышенной температуре и высоких уровнях легирования; также кристаллы $Pb_{1-x}Sn_xSe$ легче скалываются по кристаллографической плоскости (100), что облегчает изготовление резонаторов. Для материала $Pb_{1-x}Sn_xSe$ при изменении состава имеет место инверсия зоны проводимости и валентной зоны, т.е. ширина запрещенной зоны при определенных составе (значении параметра состава x_i) и температуре обращается в нуль. Для $Pb_{1-x}Sn_xSe$ $x_i = 0.15$ при 4 К.

Выращивание монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ проводилось из паровой фазы в условиях свободного роста (без затравки). Состав задавался шихтой и определялся методом рентгеновского микроанализа. Для гомогенизации кристалла и для увеличения подвижности носителей заряда применялся длительный (более месяца) отжиг монокристаллических шайб как n -, так и p -типа проводимости. Далее монокристаллы ориентировались в кристаллографическом направлении [100] и перпендикулярно этому направлению разрезались на шайбы толщиной ~ 1 мм с помощью проволочной пилы. В данной работе использовались кристаллы n -типа проводимости с $x = 0.11$ – 0.12 . Концентрация и подвижность электронов составляли соответственно $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $1.6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 77 К.

После удаления нарушенного слоя в шайбе создавался p – n -переход путем проведения диффузии из диффузанта $Pb_{0.49}Se_{0.51}$ при температуре 425–450°C. Глубина p – n -перехода при этом варьировалась от 30 до 50 мкм. Омические контакты изготавливались напылением In и Au соответственно на область n - и p -типа проводимости с последующим электрохимическим осаждением слоев Au, Pd и In. Из пластинки выкалывались лазерные кристаллики по плоскостям (100) с длиной резонатора 0.3–0.5 мм, которые припаивались индием к уголковым медным держателям.

Исследования зависимостей интегральной интенсивности излучения от тока накачки инжекционных лазеров $Pb_{1-x}Sn_xSe$ в данной работе проводились в импульсном режиме (длительность импульса 2 мкс, период 500 мкс). Образец монтировался в специальной вставке в транспортный гелиевый сосуд Дьюара СТГ-40 и погружался в жидкий гелий. Для детектирования излучения служил приемник излучения на основе Ge, легированного Zn.

Измерения спектров излучения лазеров проводились при низких температурах, $T = 18$ – 80 К, лазер размещался в вакууме на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла. Все измерения проводились также в импульсном режиме, для питания лазеров использовался электронный ключ, позволяющий получать импульсы с заданными длительностью, скважностью и амплитудой, а также измерять напряжение

и ток, проходящий через лазер. Для записи спектров излучения использовался фурье-спектрометр BRUKER Vertex 80v с возможностью работы в режиме пошагового сканирования, в качестве приемника излучения при этом использовался штатный кремниевый болометр.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость интегральной интенсивности излучения инжекционного $Pb_{1-x}Sn_xSe$ -лазера 1178 от тока накачки I , полученная при температуре жидкого гелия 4.2 К. Из рисунка видно значение порогового тока, равное 0.6 А, после которого при увеличении амплитуды импульсов тока накачки сигнал от приемника Ge:Zn растет. Спектры излучения данного $PbSnSe$ -лазера 1178, измеренные при температуре $T = 18$ К и двух длительностях импульса тока накачки (амплитуда тока накачки была одинаковой в обоих случаях и равной 4 А), показаны на рис. 2. В спектрах наблюдается ярко выраженная модовая структура (разрешение спектрометра составляло 1 см^{-1}). Кривая 1 — спектр излучения при пропускании через образец импульсов тока длительностью 3 мкс, кривая 2 — 10 мкс. Видно, что положения мод в обоих случаях совпадают, с уменьшением длительности импульса накачки лишь уменьшился сам сигнал излучения лазера, что объясняется инертностью болометра, служившего в данном случае приемником. Следовательно, можно заключить, что при таком токе данный лазерный диод слабо разогревается в течение импульса накачки, что объясняется низким сопротивлением контактов.

Зависимость интегральной интенсивности излучения инжекционного $Pb_{1-x}Sn_xSe$ -лазера 1180 от тока накачки I , полученная при температуре жидкого гелия 4.2 К, представлена на рис. 3. После порогового тока (0.3 А) видно сначала плавное, а затем резкое увеличение интенсивности излучения. На рис. 4 показаны спектры

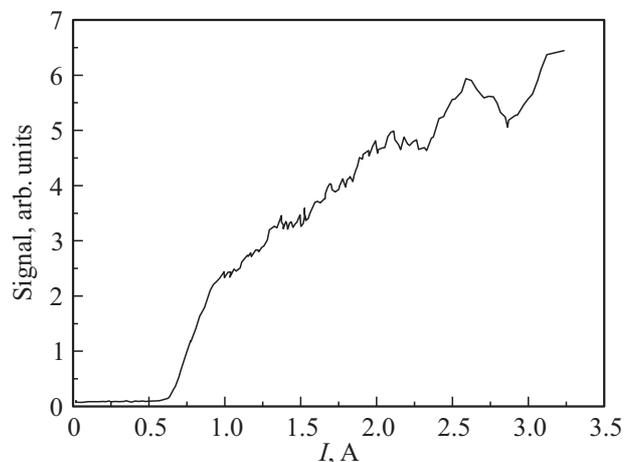


Рис. 1. Зависимость интегральной интенсивности излучения лазера на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 1178 от тока накачки при температуре жидкого гелия $T = 4.2$ К.

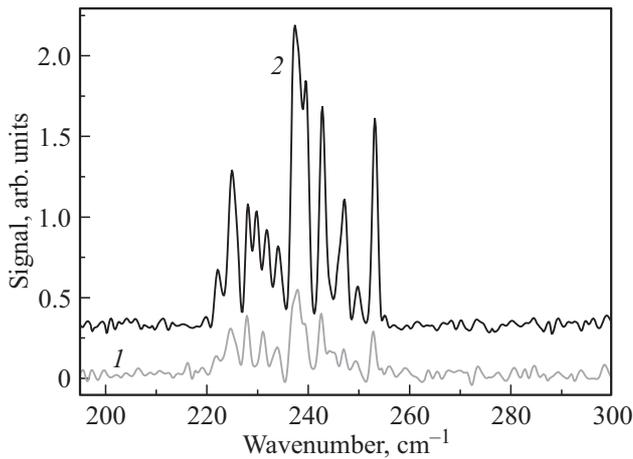


Рис. 2. Спектры излучения лазерного диода на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 1178 при $T = 18$ К различных длительностях импульса тока накачки: 1 — 3 мкс, 2 — 10 мкс. Амплитуда тока накачки 4 А.

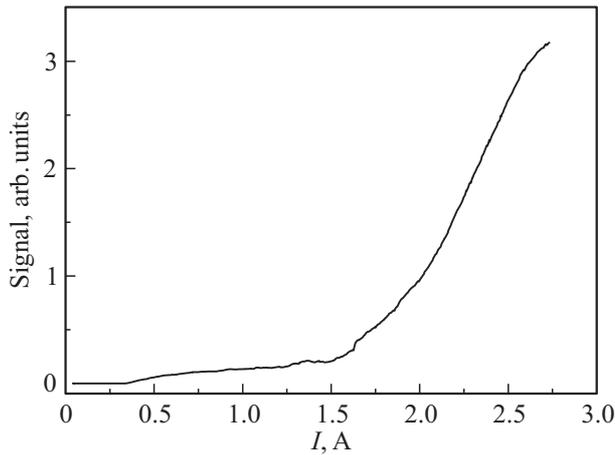


Рис. 3. Зависимость интегральной интенсивности излучения лазера на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 1180 от тока накачки при температуре жидкого гелия $T = 4.2$ К.

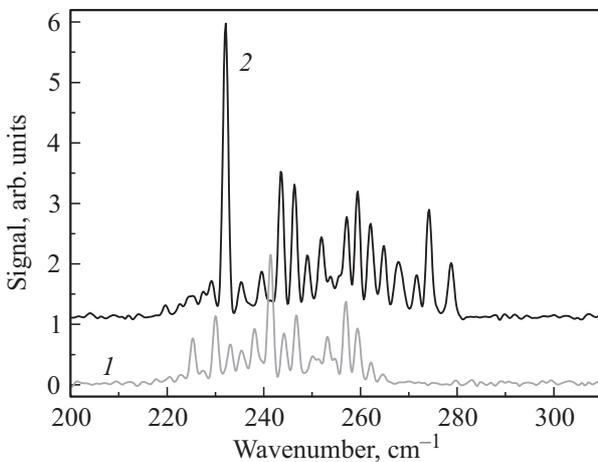


Рис. 4. Спектры излучения лазерного диода на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 1180 при $T = 18$ К и различных токах накачки: 1 — 2.5 А, 2 — 4 А. Длительность импульса 10 мкс.

излучения данного лазера 1180, измеренные при температуре $T = 18$ К и двух токах накачки. Измерения проводились в импульсном режиме, разрешение спектрометра составляло 1 см^{-1} . Кривая 1 представляет собой спектр излучения при пропускании импульсов тока через образец амплитудой 2.5 А, кривая 2—4 А (пороговый ток для этого лазера равен 1.5 А). Из сравнения двух этих кривых видно, что из-за токового разогрева в течение длинного импульса (10 мкс) происходит уширение и смещение спектра генерации в коротковолновую область. В то же время при увеличении тока над пороговым коротковолновая мода „загорается“ более интенсивно. Как следует из вольт-амперной характеристики, данный лазер имеет заметное последовательное сопротивление контактов (до 0.3 Ом), поэтому разогрев оказывается существенным. Это приводит к сдвигу спектра генерации в коротковолновую сторону на $\sim 20 \text{ см}^{-1}$, что соответствует увеличению температуры активной области на 5 К (изменение ширины запрещенной зоны с температурой $dE_g/dT \approx 4 \text{ см}^{-1}/\text{К}$).

На рис. 5 представлен спектр излучения инжекционного $Pb_{1-x}Sn_xSe$ -лазера 625a, измеренный с разрешением 0.5 см^{-1} при температуре $T = 18$ К. Состав кристалла для данного лазера соответствовал $x = 0.12$. Спектр снят при токе, превышающем порог в 1.2 раза, в отличие от работы [5], где спектр, на котором было получено излучение с длиной волны 46.2 мкм, был снят при 5-кратном превышении над порогом и температуре $T = 6$ К. Из рисунка видно, что для данных лазеров получена рекордная длина волны излучения 46.5 мкм. Следует отметить, что полученная длина волны, по нашему мнению, является далеко не предельной для лазеров на основе твердого раствора $PbSnSe$. При снижении концентрации носителей заряда можно уменьшить плазменную частоту и таким образом сдвинуть границу прозрачности полупроводника в длинноволновую область вплоть до полосы остаточных лучей, которая, по оценкам, будет вблизи 70 мкм. Таким образом, для

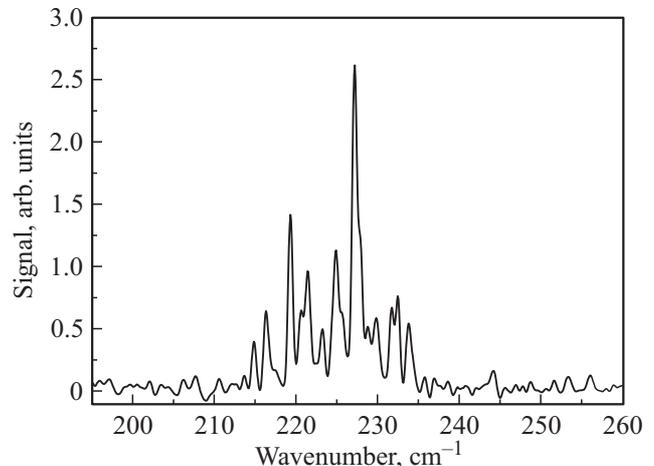


Рис. 5. Спектр излучения лазерного диода на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ 625a при токе накачки 4 А. Пороговый ток 3.3 А, $T = 18$ К.

дальнейшего продвижения в терагерцовую область спектра необходимо снижать концентрацию свободных носителей заряда в активной области лазера и увеличивать толщину активной области.

4. Заключение

Таким образом, на основе твердого раствора $Pb_{1-x}Sn_xSe$ созданы диффузионные инжекционные лазеры, излучающие в зависимости от состава и температуры в широкой области спектра (10–46.5 мкм). Для этого разработана технология выращивания качественных монокристаллов из паровой фазы в условиях свободного роста. Исследованы зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки и спектры излучения инжекционных лазеров на основе $Pb_{1-x}Sn_xSe$. В данных образцах получена лазерная генерация длинноволнового излучения вплоть до рекордной длины волны 46.5 мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-02-05470) и РАН. В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Список литературы

- [1] A.R. Calawa, J.O. Dimmock, T.C. Harman, I. Melngailis. *Phys. Rev. Lett.*, **23**, 7 (1969).
- [2] Г.С. Баронов, Д.К. Бронников, И.И. Засавицкий, С.М. Караваев, А.С. Разумов, А.П. Шотов. *Тез. докл. XIX Всес. съезда по спектроскопии* (Томск, Россия, 1983) ч. IV, с. 25.
- [3] И.И. Засавицкий, А.В. Матвеев, Б.Н. Мацонашвили, В.Т. Трофимов. *ФТП*, **20**, 214 (1986).
- [4] И.И. Засавицкий. *Тр. ФИАН (Оптические и электрические свойства полупроводников)*, **224**, 3 (1993).
- [5] Л.Н. Курбатов, А.Д. Бритов, С.М. Караваев, С.Д. Савченко, С.Н. Максимовский, И.И. Овчинников, М.М. Рзаев, П.М. Старик. *Письма в ЖЭТФ*, **37**, 422 (1983).
- [6] Д.М. Гуреев, И.И. Засавицкий, Б.Н. Мацонашвили, А.П. Шотов. *ФТП*, **12**, 1743 (1978).
- [7] Д.М. Гуреев, О.И. Даварашвили, И.И. Засавицкий, Б.Н. Мацонашвили, А.П. Шотов. *ФТП*, **13**, 1752 (1979).
- [8] К.В. Маремьянин, А.В. Иконников, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, С.В. Морозов, Л.С. Бовкун, К.Р. Умбеталиева, Е.Г. Чижевский, И.И. Засавицкий, В.И. Гавриленко. *ФТП*, **49**, 1672 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Terahertz injection lasers based on $PbSnSe$ solid solution with emission wavelength up to 46.5 μm

K.V. Maremyanin^{+,*}, V.V. Rumyantsev^{+,*},
A.V. Ikonnikov^{+,*}, L.S. Bovkun^{+,*}, E.G. Chizhevskii[‡],
I.I. Zaslavitskii[‡], V.I. Gavrilenko^{+,*}

⁺ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

^{*} Lobachevsky State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

[‡] Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract Diffusion injection lasers based on $Pb_{1-x}Sn_xSe$ solid solution emitting in dependence on the composition and temperature over a wide spectral range (10–46.5 μm) were created. The technology of cultivation of high-quality single crystals from the vapor phase in a free growth has been developed. We were investigated dependence of the integrated radiation intensity on the pump current and the emission spectra of $Pb_{1-x}Sn_xSe$ diode lasers. In these samples, laser generation of the long-wave radiation up to a record 46.5 μm wavelength has been obtained.