

УДК 53.06; 53.09
EDN: NMPVFE

PACS: 42.55.Px

Получение GeO_2 - SiO_2 ионным распылением для изучения генерации лазерного диода с внешним планарным волноводным отражателем

© М. А. Кононов*, В. В. Светиков, В. И. Пустовой

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия***E-mail: mike@kapella.gpi.ru**Статья поступила в редакцию 25.03.2025; после доработки 16.04.2025; принята к публикации 11.08.2025**Шифр научной специальности: 1.3.19*

Представлены экспериментальные исследования лазерной генерации широкополоскового (100 мкм) полупроводникового лазера во внешнем резонаторе на основе планарной волноводной структуры с брэгговской решёткой. Планарная волноводная структура была выполнена на Si-подложках с GeO_2 : SiO_2 -волноводным слоем контрастностью 2,4 %. Пленка волноводного слоя была получена распылением германосиликатных стекол $\text{GeO}(0.5)$: $\text{SiO}_2(0.5)$ и $\text{GeO}(0.5)$: $\text{SiO}(0.5)$ ионами аргона на холодные подложки Si(100) и плавленого кварца в вакууме. Найдены режимы работы ионного источника необходимые для формирования нанокристаллов германия в пленках $\text{GeO}:\text{SiO}$ и $\text{GeO}:\text{SiO}_2$. Пленки подвергались отжигу при температуре до 900 °C. Наличие и фазовый состав нанокластеров германия в пленках удовлетворяли необходимым условиям лазерной генерации и распределение излучения в дальней зоне в зависимости от относительного положения плоскостей волновода ЛД и волновода внешней планарной структуры. Показано, что в лазерной генерации преобладает поперечная мода высокого порядка, при этом наблюдается существенное уменьшение спектральной ширины излучения и стабилизация спектра во всём диапазоне рабочих токов. В полученных образцах продемонстрирована лазерная генерация на безизлучательной и на истекающих волноводных модах во внешних планарных структурах.

Ключевые слова: ионное распыление; лазерная генерация; планарный волновод; волноводная мода; истекающая мода.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-107-112

Введение

Полупроводниковые лазеры благодаря своему высокому КПД, малым размерам и высокой технологичности изготовления получили наибольшее распространение среди источников когерентного излучения. Полупроводниковые лазеры оказались востребованными в таких отраслях науки как, обработка материалов, биомедицина, навигация, телекоммуникации, охрана объектов, а также во многих смежных отраслях. По величине выходной мощности полупроводниковые лазеры можно разделить на маломощные и лазеры высокой

мощности. Первые используются преимущественно в телекоммуникационных приложениях, вторые широко используются в сенсорике, биомедицине, навигации, обработке материалов.

К мощным лазерам относятся лазеры с выходной мощностью от нескольких десятков милливатт и выше. Простейшими лазерами высокой мощности являются лазеры с широким контактом. Благодаря простоте конструкции такие лазеры получили широкое распространение, однако у них есть существенный недостаток, сильно ограничивающий их применение. Из-за большой длины и широкого

контакта, благодаря чему и удаётся получить высокую мощность лазеров, в таких конструкциях возбуждаются широкие спектры продольных и поперечных мод, кроме этого возникает неконтролируемая филаментация активной области [1–3]. В совокупности эти факторы сильно уменьшают яркость полупроводникового лазера. Это обстоятельство является препятствием для использования таких лазеров в широком круге приложений, в которых по остальным критериям конкурентов им не имеется. В связи с этим применительно к таким лазерам актуальны задачи селекции поперечных и продольных мод. Для решения таких задач наряду со специальными конструкциями лазерного диода, используются различные конструкции внешних резонаторов. Достаточно эффективными геометриями внешних резонаторов являются двухплечевые резонаторы (или V-резонаторы) [4–8], в которых повышается добротность одной из поперечных мод. Для достижения высокой эффективности таких резонаторов недостаточно обеспечение только угла возврата лучей обратной связи [8], необходимо также обеспечить спектральную и пространственную фильтрацию излучения обратной связи [4]. К решению этого вопроса относится и способ напыления волноводного слоя в отличие от ранее используемых способов [9–11]. Метод ионного распыления мишени необходимого состава ионным источником был отработан ранее и описан в предыдущих работах [12–14]. На рисунке 1 представлена схема получения пленок $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$.

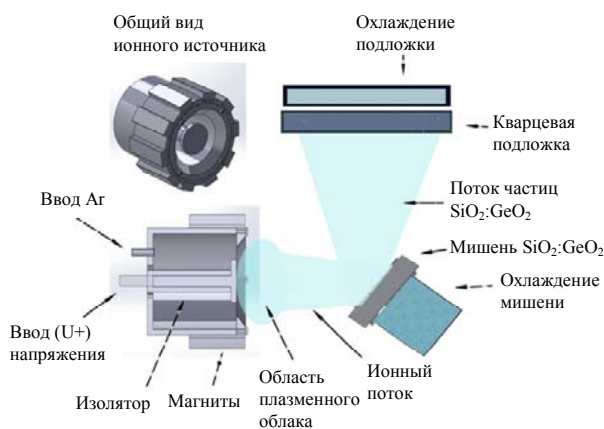


Рис. 1. Схема устройства распыления мишени $\text{SiO}_2:\text{GeO}_2$

Особенности напыленного волноводного слоя

Конструкции внешних резонаторов состоят из ряда внешних элементов, которые требуют точного согласования друг с другом, что часто приводит к возникновению зависимости параметров излучения от внешних механических воздействий. В связи с этим представляют интерес конструкции с одним внешним элементом, выполняющим функции спектрального, фазового и пространственного селектора. Такой подход реализован, например, в работах [15, 16]. В предложенных конструкциях использовалась планарная цифровая голограмма. Простейшим вариантом голограммы является брегговская решётка. Для мощных лазеров такие конструкции реализованы в виде объёмных брегговских структур [17–20], которые показали высокую эффективность. Для реализации описанной выше конструкции были получены тонкие пленки GeO , SiO и $\text{GeO}:\text{SiO}_2$ посредством одновременного распыления составной мишени из GeO_2 и SiO_2 с помощью пучка ионов Ar , энергия которого варьировалась от 2 до 4 KeV в зависимости от необходимых свойств пленки. Мощность ионного пучка, которым распылялась мишень, подбиралась таким образом, чтобы скорость осаждения обоих компонент была одинаковой. Известно, что при распылении мишени GeO_2 на подложку осаждается слой GeO_x со стехиометрическим параметром $x \sim 1$. Пленки осаждались при температуре 100°C на подложки из плавленого кварца и $\text{Si}(100)$. Толщина пленок составляла ~ 750 нм. Пленки затем покрывали защитным слоем SiO_2 толщиной 10 нм, чтобы избежать испарения монооксида германия в процессе отжига [21]. После того как были получены удовлетворительные результаты по напылению пленок $\text{SiO}_2:\text{GeO}_2$ подходящего состава для исследования лазерной генерации ЛД с зеркалом обратной связи на основе волноводной брегговской решётки, была изготовлена планарная волноводная структура на Si -подложке (рис. 2).

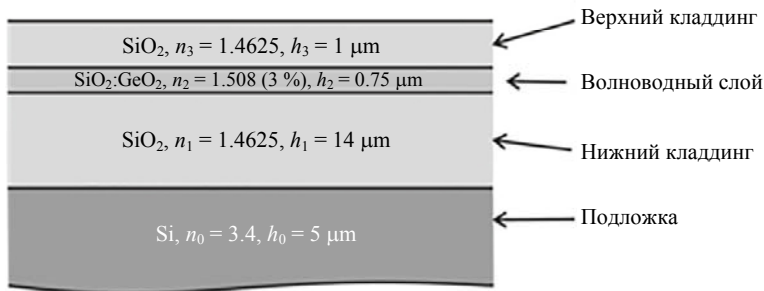


Рис. 2. Структура планарного волновода, использованная в экспериментах

Структура была рассчитана для возбуждения одной волноводной моды и состояла из двух кладынговых слоёв SiO₂ и волноводного слоя SiO₂:GeO₂. Нижний кладынговый слой толщиной $h = 14$ мкм изолировал волноводную моду от Si-подложки, верхний слой толщиной $h = 1$ мкм защищал волновод от воздействий внешней среды. Волноводный слой был изготовлен из SiO₂:GeO₂ с показателем преломления $n = 1,492$, что составляло 2,4%-й контраст к показателю преломления нижнего кладынга. Толщина волноводного слоя равнялась $h = 0,75$ мкм. Из расчётов следует, что ширина основной моды по амплитуде поля на уровне $1/e$ равна примерно 1,8 мкм. По интенсивности поля ширина равна примерно 1,3 мкм. Данная структура поддерживает только одну волноводную моду, остальные моды, возбуждаемые в структуре, являются модами утечки в Si-подложку. Затухание кладынговых мод на 9–10 порядков больше затухания основной моды, распространяющейся по волноводному слою. Брэгговская решётка с периодом $\lambda = 360$ нм была изготовлена в волноводной структуре методом травления периодически расположенных канавок на поверхности волноводного слоя (слой SiO₂:GeO₂). Глубина травления составляла 40 нм. Брэгговская решётка располагалась на расстоянии 1 мм от входного торца планарного волновода, длина решётки – 1,6 мм.

Лазерная генерация

Исследование лазерной генерации диодного лазера с планарной брэгговской решёткой показало возможность устойчивой генерации при токах вплоть до номинального $I_{rat} = 2$ А на двух спектральных линиях: 1059,4 нм и 1067,1 нм (рис. 3).

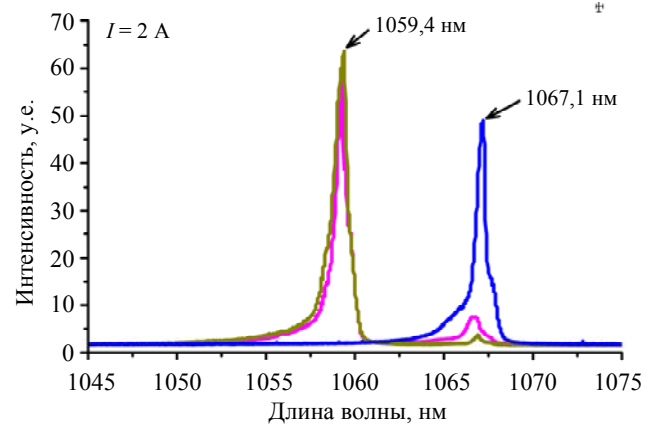


Рис. 3. Спектры лазерной генерации диодного лазера с планарной волноводной Брэгговской решёткой при номинальном управляющем токе $I = 2$ А при различном взаимном расположении плоскостей волновода ЛД и внешней структуры (синяя кривая: совмещение плоскостей волновода ЛД и плоскости волновода внешней структуры; фиолетовая кривая: рассогласование плоскостей на 1,2 мкм; серая кривая: рассогласование плоскостей на 3,3 мкм)

Генерация на длине волны $\lambda = 1067,1$ нм возможна во всём рабочем диапазоне длин волн. На длине волны $\lambda = 1059,4$ нм генерация происходит только при непрерывных токах накачки 400–500 мА вдвое меньших номинального тока $I < I_{rat}/2$ ($I_{rat} = 2$ А). При больших токах накачки спектр генерации состоит либо из одной линии $\lambda = 1067,1$ нм, либо одновременно из двух 1067,1 нм и 1059,4 нм. При этом появление в спектре генерации длины волны $\lambda = 1059,4$ нм происходит только при смещении планарной волноводной структуры вдоль направления, перпендикулярного к плоскости планарных волновода на величину $\Delta z = 1,2$ –3,3 мкм вверх относительно положения, при котором происходит генерация на спектральной линии $\lambda = 1067,1$ нм.

Как указывалось, возбуждение двух спектральных полос происходит только при

токах накачки более $I > 0,5I_{rat}$ ($I > 1$ А). В этих случаях интенсивность моды на длине волны 1067,1 нм составляет примерно 3–5 % от интенсивности моды на $\lambda = 1059,4$ нм. Это справедливо для всех случаев, кроме случая отстройки по вертикали на $\Delta z = 3,3$ мкм. В последнем случае интенсивности обеих спектральных полос примерно одинаковы (рис. 4).

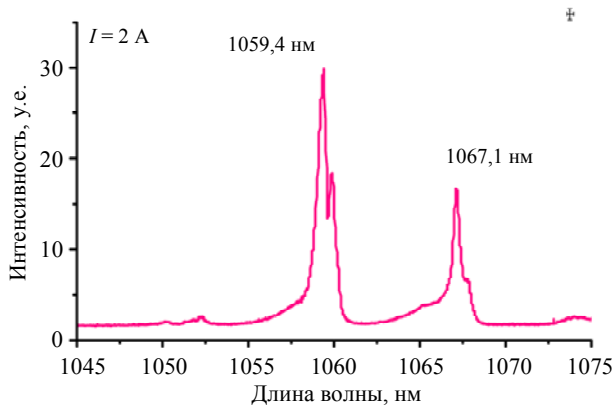


Рис. 4. Спектр генерации лазерного диода при вертикальном рассогласовании плоскостей волновода ЛД и волновода внешней структуры на $\Delta z = 3,3$ мкм

Наличие двух спектральных полос лазерной генерации связано, как представляется, с возбуждением основной и первой клады мод планарного волновода. В рамках этой модели длина волны генерации 1067,1 нм соответствует основной моде планарного волновода, в то время как длина волны 1059,4 нм соответствует клады моде. По разнице длин волн генерации можно определить разницу в эффективных показателях преломления возбуждаемых в планарном волноводе мод:

$$\Delta n_{0-1}^* = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{2\Lambda}$$

где λ_0 и λ_1 – длины волн генерации (брэгговские длины волн: $\lambda_1 = 2\Lambda n_1^*$, $\lambda_2 = 2\Lambda n_2^*$), n_1^* и n_2^* – эффективные показатели преломления волноводных мод планара.

В нашем случае $\lambda_1 - \lambda_2 = 7,7$ нм, что согласно уравнению (1) соответствует разнице эффективных показателей преломления $\Delta n^* = 0,0107$.

Заключение

Было показано, что используя метод ионного распыления составной мишени GeO_2

и SiO_2 можно получать пригодные для исследования волноводные слои. На основе предложенной технологии была изучена лазерная генерация широкополоскового полупроводникового лазерного диода с планарным волноводным Брегговским зеркалом во внешнем резонаторе. При использовании волновода с контрастностью 3 % и безлинзовой связью между ЛД и планарным волноводом, было показано, что лазерная генерация имеет устойчивый характер вплоть до номинальных токов накачки ЛД. Наблюдалась лазерная генерация, распределение интенсивности, в дальней зоне которой соответствует преобладанию поперечной моды высокого порядка с поперечным периодом примерно 12 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thompson G. H. B. / Opto-electronics. 1972. Vol. 4. P. 257.
2. Бахерт Х.-Ю., Богатов А. П., Елисеев П. Г. / Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 3. С. 603.
3. Goldberg L., Surette M. R., Mehuys D. / Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 62. P. 2304.
4. Raab V., Menzel R. / Optics Letters. 2002. Vol. 27. № 3. P. 167.
5. Thestrup B., Chi M., Petersen P. M. / Proc. SPIE. 2004. Vol. 5336. P. 39.
6. Jechow A., Raab V., Menzel R., Cenker M., Stry S., Sacher J. / Optics Communications. 2007. Vol. 277. P. 161.
7. Светиков В. В., Нурлигареев Д. Х. / Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 9. С. 810.
8. Светиков В. В., Кононов М. А. / Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 8. С. 706–710.
9. Астанкова К. Н., Горохов Е. Б., Володин В. А., Марин Д. В., Азаров И. А., Латышев А. В. / Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 5–6. С. 59.
10. Гориков О. Н., Дудин Ю. А., Камин В. А. и др. / Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 12. С. 39–47.
11. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
12. Burkhanov G. S., Lachenkov S. A., Bashlakov A. U., Kirillova V. M., Sdobyrev V. V., Kononov M. A. / Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. № 2. P. 466–472.
13. Бурханов Г. С., Лаченков С. А., Кононов М. А., Баулаков А. У., Кириллова В. М., Сдобырев В. В. / Перспективные материалы. 2021. № 10. С. 37–46.
14. Burkhanov G. S., Lachenkov S. A., Kononov M. A. / Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012033.
15. Svetikov V., Ivonin I., Koshelev A., Velikov L., Vorobiev Yu., Goltsov A., Yankov V. / Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 7918. P. 79180P.

16. Svetikov V., Peroz C., Ivonin I., Dhuey S., Cabrini S., Babin S., Goltsov A., Yankov V. / J. Opt. Soc. Am. B. 2013. Vol. 30. № 3. P. 610–614.

17. Helan Mikel R., Cip O., Jedlicka P. / Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7155. P. 71552T.

18. Stolpner L., Lee S., Li S., Mehnert A., Mols P., Siala S., Bush J. / Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7004. P. 700457.

19. Alalusi M., Brasil P., Lee S., Mols P., Stolpner L., Mehnert A., Li Steve / Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7316. P. 73160X.

20. Venus G. B., Sevian A., Smirnov V. I., Glebov L. B. / Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5711. P. 166–176.

21. Vinogradov S. V., Kononov M. A., Savranskii V. V., Valyanskii S. I. / Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2003. Vol. 2. P. 3.

PACS: 42.55.Px

Production of $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ by ion sputtering for studying the generation of a laser diode with an external planar waveguide reflector

M. A. Kononov*, V. V. Svetikov and V. I. Pustovoy

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*E-mail: mike@kapella.gpi.ru

Received 25.03.2025; revised 16.04.2025; accepted 11.08.2025

The paper presents experimental studies of lasing of a broadband (100 μm) semiconductor laser in an external resonator based on a planar waveguide structure with a Bragg grating. The planar waveguide structure was fabricated on Si substrates with a $\text{SiO}_2\text{:GeO}_2$ waveguide layer with a contrast of 2.4 %. The waveguide layer film was obtained by sputtering germanosilicate glasses $\text{GeO}(0.5)\text{:SiO}_2(0.5)$ and $\text{GeO}(0.5)\text{:SiO}(0.5)$ with argon ions on cold Si(100) and fused quartz substrates in high vacuum. The operating modes of the ion source required for the formation of germanium nanocrystals in $\text{GeO}\text{:SiO}$ and $\text{GeO}\text{:SiO}_2$ films were found. Then the films were annealed at temperatures up to 900 °C. The presence and phase composition of germanium nanoclusters in the films satisfied the necessary conditions for laser generation and the distribution of radiation in the far zone depending on the relative position of the planes of the LD waveguide and the waveguide of the external planar structure. It is shown that the high-order transverse mode predominates in laser generation, with a significant decrease in the spectral width of the radiation and stabilization of the spectrum in the entire range of operating currents. Laser generation on the nonradiative and leaky waveguide modes of the external planar structure is demonstrated.

Keywords: ion sputtering; laser generation; planar waveguide; waveguide mode; leaky mode.

REFERENCES

1. Thompson G. H. B., Opto-electronics **4**, 257 (1972).
2. Bachert H.-U., Bogatov A. P. and Eliseev P. G., Quantum Electronics **5** (3), 603 (1978).
3. Goldberg L., Surette M. R. and Mehuys D., Appl. Phys. Lett. **62**, 2304 (1993).
4. Raab V. and Menzel R., Optics Letters **27** (3), 167 (2002).
5. Thestrup B., Chi M. and Petersen P. M., Proc. SPIE **5336**, 39 (2004).
6. Jechow A., Raab V., Menzel R., Cenker M., Stry S. and Sacher J., Optics Communications **277**, 161 (2007).
7. Svetikov V. V. and Nurligareev D. H., Quantum Electronics **44** (9), 810 (2014).
8. Svetikov V. V. and Kononov M. A., Quantum Electronics **48** (8), 706–710 (2018).
9. Astankova K. N., Gorokhov E. B., Volodin V. A., Marin D. V., Azarov I. A. and Latyshev A. V., Russian nanotechnologies **11** (5–6), 59 (2016).
10. Gorshkov O. N., Dudin Yu. A., Kamin V. A. et al., Letters to the Journal of Technical Physics **31** (12), 39–47 (2005).
11. Hansperger R. Integral Optics: Theory and Technology: Trans. from English. Moscow: Mir, 1985.

12. Burkhanov G. S., Lachenkov S. A., Bashlakov A. U., Kirillova V. M., Sdobyrev V. V. and Kononov M. A., *Inorganic Materials: Applied Research* **13** (2), 466–472 (2022).
13. Burkhanov G. S., Lachenkov S. A., Kononov M. A., Bashlakov A. U., Kirillova V. M. and Sdobyrev V. V., *Advanced materials*, № 10, 37–46 (2021).
14. Burkhanov G. S., Lachenkov S. A. and Kononov M. A., *Journal of Physics: Conference Series* 012033 (2018).
15. Svetikov V., Ivonin I., Koshelev A.; Velikov L., Vorobiev Yu., Goltsov A. and Yankov V., *Proceedings of SPIE* **7918**, 79180P (2011).
16. Svetikov V., Peroz C., Ivonin I., Dhuey S., Cabrini S., Babin S., Goltsov A. and Yankov V., *J. Opt. Soc. Am. B* **30** (3), 610–614 (2013).
17. Helan Mikel R., Cip O. and Jedlicka P., *Proc. of SPIE* **7155**, 71552T (2008).
18. Stolpner L., Lee S., Li S., Mehnert A., Mols P., Siala S. and Bush J., *Proc. of SPIE* **7004**, 700457 (2008).
19. Alalusi M., Brasil P., Lee S., Mols P., Stolpner L., Mehnert A. and Li Steve, *Proc. of SPIE* **7316**, 73160X (2009).
20. Venus G. B., Sevian A., Smirnov V. I. and Glebov L. B., *Proc. of SPIE* **5711**, 166–176 (2005).
21. Vinogradov S. V., Kononov M. A., Savranskii V. V. and Valyanskii S. I., *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **2**, 3 (2003).

Об авторах

Кононов Михаил Анатольевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: mike@kapella.gpi.ru SPIN-код РИНЦ 8607-2597, Author ID 30241

Светиков Владимир Васильевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: vl.svetikov@gmail.com SPIN-код РИНЦ 7500-2560, Author ID 30329

Пустовой Владимир Иванович, заведующий отделом ЛФ, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). Author ID 18514