

УДК 538.915
EDN: XZAIRQ

PACS: 81.15.Hi

**Эпитаксиальное выращивание твердых растворов InAlSb слоев
с низким содержанием алюминия**© В. С. Кривобок^{1,2}, А. А. Пручкина^{1*}, С. И. Ченцов¹, К. А. Савин¹, И. И. Минаев¹,
Г. Н. Ерошенко¹, А. В. Клековкин¹, А. С. Лосунов¹, С. Н. Николаев¹¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

* E-mail: pruchkinaaa@lebedev.ru

² АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 11.08.2026; после доработки 27.08.2026; принята к публикации 22.10.2026

Шифр научной специальности: 1.3.8.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках InSb(100) получены слои напряженных твердых растворов InAlSb с низким содержанием алюминия. Слои охарактеризованы с помощью рентгеноструктурного анализа, атомно-силовой микроскопии и низкотемпературной фотолюминесценции. Показано, что в диапазоне температур 350–390 К возможно получение однородных по составу и свободных от дефектов твердых растворов InAlSb с краем фундаментального поглощения, смещенным в коротковолновую область по отношению к InSb.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, ИК фотодетектор, InSb, фоточувствительный элемент.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-39-44

Введение

Антимонид индия (InSb) является одним из основных узкозонных полупроводников для создания фоточувствительных элементов и матричных фотоприемников среднего инфракрасного диапазона (3–5 мкм). Благодаря высокой подвижности носителей заряда, малой ширине запрещенной зоны и хорошо развитой технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) InSb широко применяется в высокочувствительных ИК-фотодетекторах [1]. При температуре 80 К ширина запрещенной зоны InSb составляет около 0,233 эВ [2], что соответствует длинноволновой границе фоточувствительности 5,2–5,3 мкм.

Однако для ряда практических задач такая граница является избыточной. Увеличение ширины запрещенной зоны позволяет сместить край фоточувствительности в коротковолновую область и одновременно снизить

концентрацию термически генерируемых носителей, уменьшая темновой ток и шумы фотоприемников.

Одним из перспективных способов решения этой задачи является использование твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ с низким содержанием алюминия. Согласно литературным данным [2] ширина запрещенной зоны $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ возрастает практически линейно с увеличением концентрации Al

$$E_g = 0,233 + 1,69x \pm 0,05x, \text{ эВ} \quad (1)$$

достигая около 0,25 эВ уже при содержании алюминия 1–2 % [3, 4]. При этом физические свойства материала и технологические процессы изготовления приборов остаются близкими к используемым для InSb.

Однако сам эпитаксиальный рост твердых растворов InAlSb значительно сложнее, чем InSb, вследствие низкой поверхностной

подвижности атомов алюминия. Поэтому качество слоев существенно зависит как от температуры роста, так и от отношения потоков элементов III и V групп. Ранее было показано, что получение псевдоморфных слоев высокого качества возможно лишь в узком диапазоне температур роста [5], а отклонение температуры и отношения потоков приводит к ухудшению морфологии поверхности и образованию V-образных дефектов [6].

Несмотря на большое число исследований гетеросистемы InSb/InAlSb большинство работ было посвящено структурам с высоким содержанием алюминия, тогда как напряженные слои $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ с низкой концентрацией Al ($< 5\%$), предназначенные для использования в качестве поглощающего материала фотоприемников среднего ИК-диапазона, изучены значительно меньше. В связи с этим целью настоящей работы является разработка технологии МПЭ напряженных слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ с низким содержанием алюминия на подложках InSb(001) и исследование их структурных и оптических свойств.

Результаты и обсуждение

Все исследованные в данной работе структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber Compact-21T и представляли собой слои InAlSb с содержанием алюминия $x < 5\%$. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины $n\text{-InSb}$ (100), легированные теллуром до концентрации $\sim 6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Перед ростом проходил поиск оптимальных условий подготовки ростовой поверхности пластин в камере МЛЭ. Для этого in-situ анализировалась картина дифракции быстрых электронов.

При температуре подложки $T_{\text{sub}} \sim 350 \text{ C}$ регистрировалась реконструкция 1×3 , но рефлексы были размыты (уширены).

При $T_{\text{sub}} \sim 360 \text{ C}$ рефлексы слегка вытягивались, но всё ещё были размыты. При $T_{\text{sub}} \sim 370 \text{ C}$ рефлексы стали уже, и наблюдалась хорошо выраженная реконструкция 1×3 . Перед ростом InAlSb выращивался буферный слой In(As)Sb с содержанием As до $0,4\%$. Рост буфера и слоя $\text{InAl}_{1-x}\text{Sb}_x$ проходил при

различных температурах и отношениях потоков компонент III/V группы. В данной работе будут подробно обсуждаться эпитаксиальные слои, параметры роста которых обеспечивали приемлемое структурное совершенство, см. таблицу.

Таблица

Параметры гетероструктур. Толщина (L) и составы (x, y) различных слоев определялись на основе аппроксимации рентгеновских кривых качания

№		Буфер $\text{InAs}_y\text{Sb}_{1-y}$	Слой $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$
88	Состав	$y = 0,39\%$	$x = 2,26\%$
	L, нм	350	574
	T, °C	350	360
89	Состав	$y = 0,25\%$	$x = 2,21\%$
	L, нм	360	552
	T, °C	370	380
91	Состав	$y = 0,37\%$	$x = 2,0\%$
	L, нм	320	541
	T, °C	380	390
66	Состав	—	$x = 0\%$
	L, нм	—	1000
	T, °C	—	350
104	Состав	$y = 0\%$	$x = 1,6\%$
	L, нм	300	2000
	T, °C	340	350

Для анализа морфологии поверхности выращенных структур применялась атомно-силовая микроскопия (АСМ). На рис. 1а–в приведены АСМ изображения поверхности структур 88, 89, 91. Для каждой структуры видны террасы послойного роста. На поверхности образцов отсутствуют видимые следы дефектов, средняя шероховатость поверхности слоев не превышала $0,15 \text{ нм}$ для всех образцов. Данная величина, существенно меньшая ширины одного монослоя In(Al)Sb, подтверждает высокое качество поверхности и отсутствие каких-либо признаков потери плоского фронта кристаллизации.

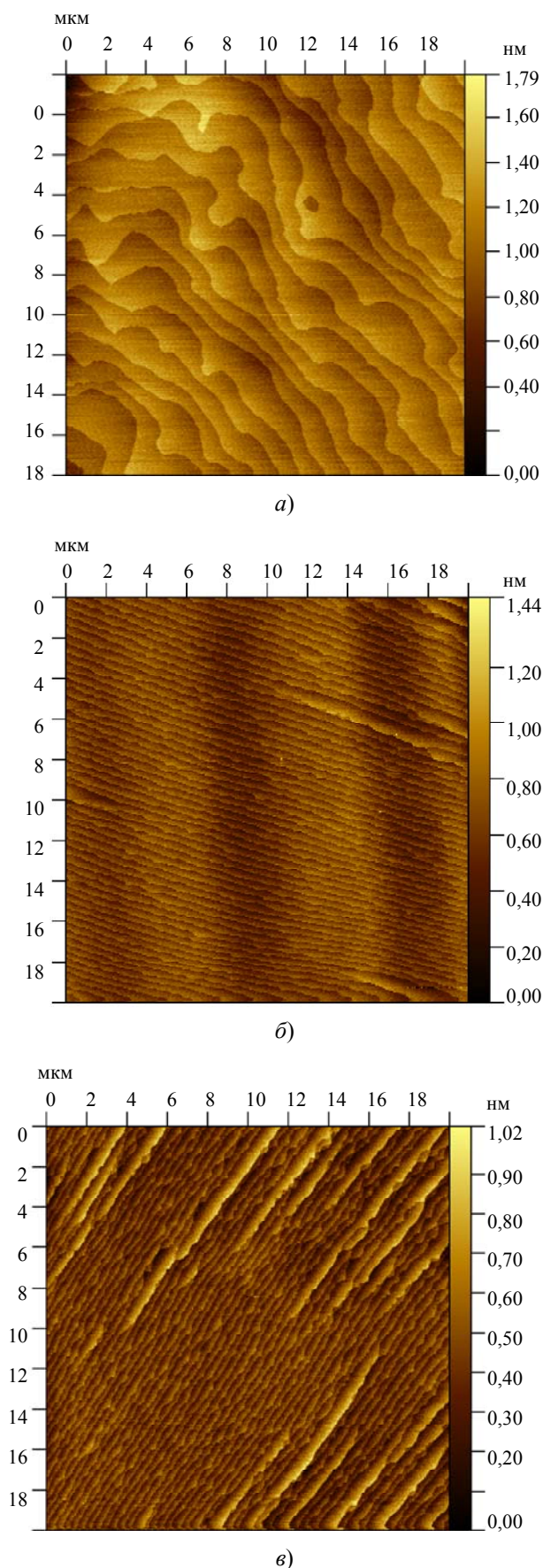


Рис. 1. Изображения поверхности структур № 88 (сверху), 89 (в центре) и (91) снизу, полученные на АСМ

Для структурной характеристики выращенных слоев использовался рентгенодифракционный анализ, выполненный с помощью дифрактометра ДРОН-8Т, оснащённого рентгеновской трубкой с медным катодом ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Для измерений использовался сцинтилляционный точечный детектор, схема измерения – с монохроматором первичного пучка (прорезной кристалл Ge 004 с четырёхкратным отражением) и монохроматором-анализатором на дифрагированном пучке (прорезной кристалл Ge с трёхкратным отражением). Измерения проводились стандартным 2θ – Ω методом. Сначала определялись параметры χ и Ω , соответствующие углу 2θ подложки, после чего проводился 2θ – Ω скан. Для моделирования с помощью ПО переходили к углу θ , причём нулём выбирался угол, соответствующий InSb подложке $28,38^\circ$. Параметрами выступали толщина (определяемая по соответствующим интерференционным максимумам) и стехиометрический состав выращенных слоёв.

Характерный вид кривой качания (образец № 89) показан на рисунке 2. Пик 1 соответствует подложке GaSb. Пики 2 и 3 соответствуют слоям In(As)Sb и $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, соответственно. Также в спектре присутствуют интерференционные особенности, период которых определяется толщинами слоёв 2 и 3. Как видно из рис. 2, используемая двухслойная модель (красная кривая) хорошо соответствует эксперименту (черная кривая).

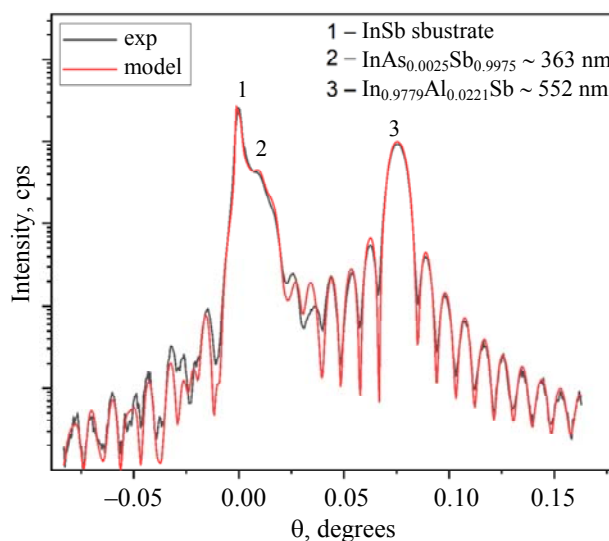


Рис. 2. Рентгеновская кривая качания для образца 89 вблизи рефлекса [004]

Для корректного определения состава необходима также информация о степени релаксации напряжений в слоях, которую невозможно определить измерением только кривых качания прямых рефлексов – нужно построить карту обратного пространства (КОП) косого рефлекса. Для построения КОП вокруг несимметричного (косого) рефлекса, например, (115) в кубических полупроводниках, выполняют серию связанных 2θ – Ω сканов. При каждом фиксированном Ω проводится 2θ – Ω сканирование: детектор движется по 2θ , а образец синхронно по Ω . В результате получается двумерный массив данных $I(\Omega, 2\theta)$. Для косого рефлекса такая схема позволяет независимо отследить изменения как горизонтальной (параллельной поверхности), так и вертикальной (перпендикулярной поверхности) составляющих вектора рассеяния. Каждой точке $(\Omega, 2\theta)$ ставится в соответствие вектор рассеяния q . Компонентами вектора являются $q_{\parallel}$ (qx) – компонента, параллельная плоскости образца, и $q_{\perp}$ (qz) – перпендикулярная ей. Преобразование каждого измерения $I(\Omega, 2\theta)$ в координаты $(q_{\parallel}, q_{\perp})$ дает КОП. На рис. 3 представлена характерная КОП (образец № 91) для наших образцов. В случае полностью нерелаксированного слоя постоянные решётки вдоль ox и oy у подложки и слоя должны совпадать. Поскольку именно они определяют значение $q_{\parallel}$, то на КОП пик слоя и пик подложки будут лежать на одной вертикальной прямой. Так и наблюдается в нашем случае (рис. 3). Следовательно, выращенные слои являются нерелаксированными.

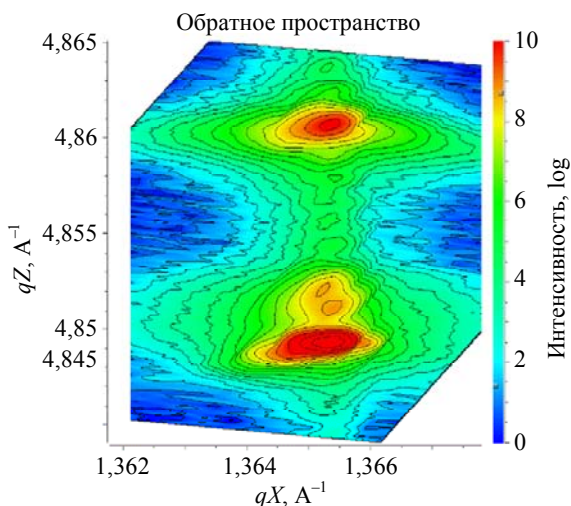


Рис. 3. Двумерная КОП на примере образца № 91

Для определения ширины запрещенной зоны в выращенных слоях использовались измерения фотолюминесценции (ФЛ) при температуре 80 К. Образец находился в вакууме на медном хладопроводе и возбуждался стационарным лазером, работающим на длине волны 1,55 мкм. Рекомбинационное излучение анализировалось решеточным спектрографом и регистрировалось охлаждаемым КРТ детектором, работающим в режиме синхронного детектирования.

Типичный спектр ФЛ слоев $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ (синяя кривая) и InSb (серая кривая) приведен на рис. 4. Как видно из рисунка, в каждом случае спектр представляет собой асимметричную полосу, коротковолновый край которой определяется эффективной температурой неравновесных носителей, а длинноволновый – структурой комбинированной плотности состояний вблизи края поглощения. Качественное сходство длинноволновых крыльев у двух кривых на рис. 4 позволяет утверждать, что добавление Al не приводит к заметному размытию комбинированной плотности состояний вблизи края поглощения. Это означает, что роль флуктуаций потенциала, как в валентной зоне, так и в зоне проводимости InAlSb не является существенной. В то же время, коротковолновый сдвиг линии при переходе от InSb к InAlSb составляет приблизительно 20 мэВ. Это означает, что ширина запрещенной зоны в InAlSb при $x = 2,21\%$ увеличена до $\sim 0,25$ эВ.

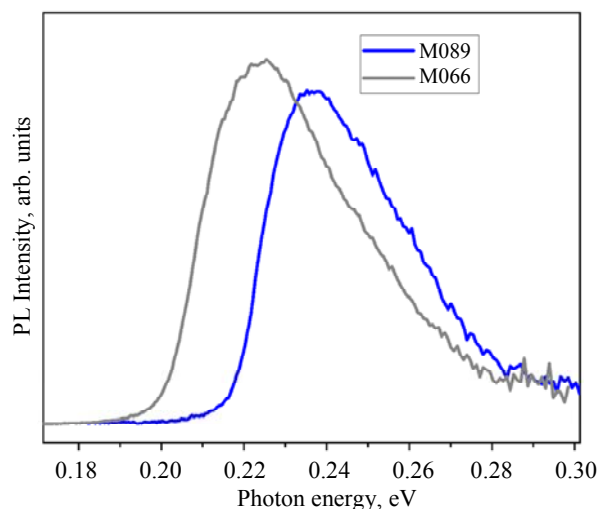


Рис. 4. ФЛ образцов 66 и 89 при $T = 80$ К

Расхождение между экспериментальным значением и оценкой по выражению (1) связа-

но с тем, что последнее справедливо для релаксированного твердого раствора, тогда как исследуемый слой InAlSb является когерентно напряженным относительно подложки. При рассогласовании параметров решетки в слое возникает двуосная упругая деформация, которая через деформационные потенциалы изменяет зонную структуру материала: в рассматриваемом случае гидростатическая составляющая деформации смещает дно зоны проводимости и потолок валентной зоны в сторону меньших энергий, а сдвиговая составляющая снимает вырождение валентной зоны и расщепляет подзоны тяжелых и легких дырок. При этом подзона тяжелых дырок смещается вверх по энергии и становится верхней валентной подзоной, тогда как подзона легких дырок смещается вниз. В результате уменьшается энергия межзонного перехода, что приводит к смещению максимума фотолюминесценции в низкоэнергетическую область. Для данного слоя деформационный вклад уменьшает эффективную ширину запрещенной зоны по сравнению со значением, ожидаемым для ненапряженного InAlSb примерно на 13 мэВ. Поэтому экспериментально полученное значение E_g оказывается ниже рассчитанного по формуле (1).

Заключение

Таким образом, отработана технология термической подготовки подложек (001)InSb

перед эпитаксиальным ростом структур InAlSb. Установлены оптимальные температуры роста слоев и давления потоков, обеспечивающие высокое структурное совершенство слоев InAlSb с содержанием Al 2–3 % необходимых для создания МФПУ со смещенной длиноволновой границей чувствительности. Определен уровень фонового легирования As непосредственно из ростовой камеры. Полученные результаты представляют интерес для получения фоточувствительных материалов с улучшенными фотоэлектрическими характеристиками для ИК матриц средневолнового диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klipstein P., Aronov D., Ezra M. B., et al. / *Infrared Physics & Technology*. 2013. Vol. 59. P. 172–181.
2. Arias R. M., Armenta C. A., Emminger C., Zamarripa C. M., Samarasingha N. S., Love Ja. R., Yadav S., Zollner S. / *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2023. Vol. 41. № 2. Art. 022203.
3. Mangesh S. Diware, Tae Jung Kim, Jae Jin Yoon, Nilesh S. Barange, Jong Sung Byun, Hyoung Gon Park, Young Do Kim, Sung Ho Shin, Jong Deok Song / *Thin Solid Films*. 2013. Vol. 546. P. 26–30.
4. Yoon J. J., Kim T. J., Jung Y. W., Aspnes D. E., Kim Y. D., Kim H. J., Chang Y. C., Shin S. H., Song J. D. / *Applied physics letters*. 2010. Vol. 97. № 11. P. 111902-3.
5. Whitehouse C. R., Mcconville C. F., Williams G. M., Cullis A. G., Barnett S. J., Saker M. K., Skolnick M. S., Pitt A. D. / *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 1990. Vol. 198. P. 283–288.
6. Kim Y. H., Lee J. Y., Noh Y. G., Kim M. D., Kwon Y. J., Oh J. E. / *Journal of crystal growth*. 2006. Vol. 296. № 1. P. 75–80.

PACS: 81.15.Hi

Epitaxial growth of low-aluminum-content InAlSb solid-solution layers

V. S. Krivobok^{1,2}, A. A. Pruchkina^{1*}, S. I. Chentsov¹, K. A. Savin¹, I. I. Minaev¹,
G. N. Eroshenko¹, A. V. Klekovkin¹, A. S. Losunov¹, and S. N. Nikolaev¹

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: pruchkinaaa@lebedev.ru

² RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 11.08.2026; revised 27.08.2026; accepted 22.10.2026

Strained InAlSb solid-solution layers with low aluminum content were grown on InSb(100) substrates by molecular beam epitaxy. The layers were characterized by X-ray diffraction analysis, atomic force microscopy, and low-temperature photoluminescence. It was shown that, within the temperature range of 350–390°C, it is possible to obtain compositionally homogene-

ous and defect-free InAlSb solid solutions with the fundamental absorption edge shifted toward shorter wavelengths relative to InSb.

Keywords: molecular beam epitaxy, IR photodetector, InSb, photosensitive element.

REFERENCES

1. Klipstein P., Aronov D., Ezra M. B., et al., *Infrared Physics & Technology* **59**, 172–181 (2013).
2. Arias R. M., Armenta C. A., Emminger C., Zamarripa C. M., Samarasingha N. S., Love Ja. R., Yadav S., and Zollner S., *Journal of Vacuum Science & Technology B* **41** (2), Art. 022203 (2023).
3. Mangesh S. Diware, Tae Jung Kim, Jae Jin Yoon, Nilesh S. Barange, Jong Sung Byun, Hyoung Gon Park, Young Do Kim, Sung Ho Shin, and Jong Deok Song, *Thin Solid Films*. **546**, 26–30 (2013).
4. Yoon J. J., Kim T. J., Jung Y. W., Aspnes D. E., Kim Y. D., Kim H. J., Chang Y. C., Shin S. H., and Song J. D., *Applied physics letters*. **97** (11), 111902-3 (2010).
5. Whitehouse C. R., Mcconville C. F., Williams G. M., Cullis A. G., Barnett S. J., Saker M. K., Skolnick M. S., and Pitt A. D., *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. **198**, 283–288 (1990).
6. Kim Y. H., Lee J. Y., Noh Y. G., Kim M. D., Kwon Y. J., and Oh J. E., *Journal of crystal growth*. **296** (1), 75–80 (2006).

Об авторах

Кривобок Владимир Святославович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия); АО «НПО «Орион» (111538, Москва, Россия). E-mail: kolob7040@gmail.com AuthorID: 135304; ORCID 0000-0001-8846-3891, Scopus AuthorID: 8604415500

Пручкина Анна Артемовна, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: pruchkina_aa@mail.ru SPIN-код: 6300-7523, AuthorID: 1132343, Scopus Author ID: 55922160600

Ченцов Семен Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: semtch@gmail.com SPIN-код: 2361-8799, AuthorID: 1288583, ORCID 0000-0001-5243-1759, Scopus Author ID: 57038999600

Савин Константин Антонович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: savinkonstantin93@gmail.com SPIN-код: 9596-3586, AuthorID: 820563, ORCID 0000-0002-5674-9577, Scopus Author ID: 57209027082

Минаев Илья Иванович, младший научный сотрудник, аспирант, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: i.minaev@lebedev.ru ORCID 0009-0007-0410-4033, Scopus ID: 57226567016

Ерошенко Григорий Николаевич, младший научный сотрудник, аспирант, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). ORCID 0009-0003-1098-1586, Scopus ID: 57225204607

Клековкин Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: klekovkinav@lebedev.ru SPIN-код: 2137-8228, AuthorID: 818286, ORCID 0000-0002-8948-4878, Scopus Author ID: 56471867800

Лосунов Антон Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия).

Николаев Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Москва, Россия). E-mail: nikolaev-s@yandex.ru SPIN-код: 6963-3322, AuthorID: 880828, ORCID 0000-0001-6739-7338, Scopus Author ID: 16425853400