



## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

УДК 535.621.373.8:535.621.375.8

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В САРАТОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

**В. М. Аникин, В. И. Цой**

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, декан, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, AnikinVM@info.sgu.ru

Цой Валерий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, tsoyvi@info.sgu.ru

В начале 1970-х гг. в Саратовском государственном университете имени Н. Г. Чернышевского (СГУ) проводились исследования по созданию комптоновского лазера на свободных электронах. Научную группу возглавлял Борис Геннадьевич Цикин, доцент кафедры электроники. Результаты этих работ представлялись в центральных научных журналах, докладывались на международных и всесоюзных научных конференциях, получили положительную оценку в обзорных статьях, которые были опубликованы в журнале «Успехи физических наук». Исследования физиков СГУ – интересная страница истории создания лазеров на свободных электронах. Последним научно-техническим достижением в этой области является Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (2017).

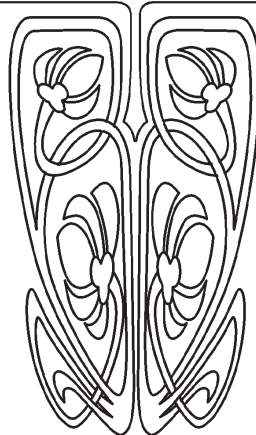
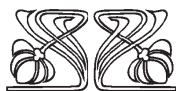
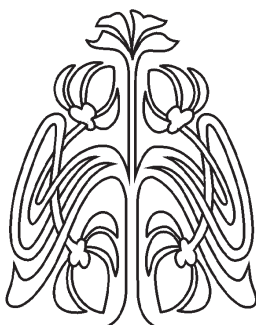
**Ключевые слова:** лазер на свободных электронах, комптоновский лазер, Саратовский университет.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148

## ПРИЛОЖЕНИЯ

1 сентября 2017 г. в Германии (Гамбург) был запущен самый крупный в мире Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (ЕРЛСЭ – European x-ray free-electron laser (European XFEL)) [1]. Осуществлен дорогостоящий проект (более 1 млрд евро), значимость которого для физики систем атомного и молекулярного масштабов сопоставима со значимостью Большого адронного коллайдера для физики элементарных частиц и космологии. Из 12 стран-участниц этого проекта наибольший финансовый вклад внесли Германия (58%) и Россия (27%). Как показывает история вопроса [2–5], в развитии физики лазерного излучения свободными электронами отечественные исследователи внесли достойный вклад. Российским ученым предоставлены приоритетные возможности работы с ЕРЛСЭ.

Действие лазеров на свободных электронах состоит в вынужденном излучении модулированного по плотности пучка электронов, что можно осуществить различными способами: при ондуляторном излучении электронного пучка в периодическом поперечном магнитном поле в лазерной системе, при вынужденном черенковском излучении, при вынужденном комптоновском рассеянии. Теория





таких лазеров показывает, что многие выводы, сделанные для одной схемы, применимы к другим. Наиболее близкая аналогия существует между ондуляторным и комптоновским лазерами [5]. Исторически первыми исследованиями вынужденного излучения свободными электронами считают посвященные комптоновскому рассеянию фотонов на электронах работы классиков квантовой физики – Э. Шредингера (1927), П. Л. Капицы и П. Дирака (1933). Следующим шагом к идее комптоновского лазера стала теория Ф. Р. Арутюняна и В. А. Туманяна (1963, Ереванский физический институт) обратного эффекта Комптона при рассеянии излучения на встречном электронном потоке с преобразованием частоты излучения в область рентгеновских частот и частот гамма-излучения [6]. Использовать обратный эффект Комптона для усиления вынуж-

денного излучения предложил Р. Пантелл с соавторами (1968, Стэнфордский университет) [7].

Свой вклад в развитие теории комптоновских лазеров на свободных электронах внесла возглавляемая доцентом кафедры электроники Борисом Геннадьевичем Цикиным небольшая группа научных сотрудников физического факультета и НИИ механики и физики Саратовского университета. В состав этой группы входили: В. А. Дубровский (ныне заведующий кафедрой медбиофизики имени В. Д. Зёрнова Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского (СГМУ), А. П. Соловьев (доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ), Н. Б. Лернер (доцент СГМУ), А. А. Колотырин (впоследствии работал ассистентом кафедры «Общая физика» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.).



Научная группа студентов и аспирантов Б. Г. Цикина. Слева направо: Б. Г. Цикин, В. А. Дубровский, А. П. Соловьев, Н. Б. Лернер, А. А. Князев (начало 1970-х гг.)



Научный коллектив Б. Г. Цикина. Сидят: О. В. Зюрюкина, Б. Г. Цикин, А. А. Князев, Н. Б. Лернер, С. С. Аркадакский; стоят: К. И. Свинолулов, А. А. Колотырин, Л. Е. Долотов (середина 1980-х гг.)



Работы этой университетской группы 1970-х гг. [8–11] неоднократно являлись предметом обсуждения в журнале «Успехи физических наук» в рамках обзоров [3–5], посвященных взаимодействию свободных электронов с электромагнитным излучением и лазерам на свободных электронах. Саратовские авторы докладывали о результатах своих работ также на международных и всесоюзных научных конференциях (Венгрия, Balatonfured, 1972; Минск, 1972; Томск, 1972; Ташкент, 1974; Тбилиси, 1976; Ленинград, 1978; Хабаровск, 1979)<sup>1</sup>. В 1977 г. В. А. Дубровский защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теория лазерного эффекта на потоке нерелятивистских электронов», а в 1979 г. А. П. Соловьев – кандидатскую диссертацию на тему «Теоретическое исследование эффекта нелинейного усиления электромагнитных волн нерелятивистским прямолинейным электронным потоком в свободном пространстве».

Центральной проблемой на пути к реализации лазера на свободных электронах было отыскание таких условий, при которых достигалось бы достаточное для генерации усиление рассеянного вынужденного излучения. В обзоре В. Л. Кузнецова [4] отмечались предложенные и теоретически обоснованные саратовской группой способы стимулирования процессов усиления. Один из них – существенное увеличение

модуляции электронного пучка волной на разностной частоте волн накачки и сигнала. Автор обзора выделил другой теоретический вывод саратовцев – об увеличении усиления при переходе от коллинеарной схемы к неколлинеарной схеме рассеяния с различающимися направлениями волн и электронного потока.

В вышеназванном обзоре на основании этих результатов была поставлена задача оптимизации углов между направлениями волн сигнала и накачки, а также их ориентации относительно электронного потока. Эта задача была решена сотрудниками двух академических институтов – Физического института имени П. Н. Лебедева и Института общей физики – Д. Ф. Зарецким, Э. А. Нерсесовым, М. В. Федоровым (1981) [5, 12, 13]. Оказалось, что оптимальные условия генерации достигаются в релятивистских электронных пучках. Работы [12, 13] отнесены в книге [2] к числу значимых достижений российских исследований в области теории лазеров на свободных электронах. Должное тому, что исследования мирового уровня московских ученых были предварены работами, выполненными в Саратовском университете, отдается посредством ссылки на работу [9] в обзоре [14], одним из соавторов которого является безусловный авторитет в области квантовой электроники А. Ярив.

Существенно отметить, что помимо исследований по вынужденному комптоновскому рассеянию членами научного коллектива Б. Г. Цикина проведен серьезный теоретический анализ процессов электронно-волнового взаимодействия в приборах СВЧ, разработаны оригинальные эффективные методы лазерной диагностики и СВЧ диагностики электронных пучков и плазмы с высокой чувствительностью и возможностями панорамного наблюдения.

### Благодарности

Авторы благодарны Д. А. Усанову за историческую справку о работах в СГУ в области теории лазеров на свободных электронах, С. С. Аркадакскому и Ю. П. Синичкину – за предоставленные фотографии.

### Список литературы

1. В Германии открыли самый мощный рентгеновский лазер на свободных электронах. URL : <http://tass.ru/nauka/4525693> (дата обращения: 02.12.2017).
2. Мухин К. Н., Суставнов А. Ф., Тихонов В. Н. Российская физика Нобелевского уровня. М. : Физматлит, 2006. 228 с.

<sup>1</sup> *Doubrovski V. A., Tzikin B. G.* On possibility of accumulation of laser radiation scattered by electron beam // Int. conf. «On Interaction of Electron with Strong Electromagnetic Field». Balatonfured, 1972. P. 22 ; *Дубровский В. А., Цикин Б. Г.* Резонансное усиление излучения ОКГ, рассеянного электронным потоком // Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по нелинейной оптике. Минск, 1972. С. 101–102 ; *Соловьев А. П., Цикин Б. Г.* О возможности усиления излучения ОКГ электронным потоком в присутствии мощной оптической накачки // VII Всесоюзная конференция «Электронные приборы СВЧ и области их применения». Томск, 1972. Вып. 4. С. 204 ; *Соловьев А. П., Цикин Б. Г.* Об оптимальной скорости электронного пучка лазера на Комптон-эффекте // Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. Ташкент, 1974. С. 194 ; *Дубровский В. А., Лернер Н. Б., Цикин Б. Г.* Полуклассическая теория Комптон-лазера (анализ методов повышения коэффициента усиления) // Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. Тбилиси, 1976. С. 321 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А., Цикин Б. Г.* Перестраиваемые лазеры на электронных потоках (анализ методов повышения коэффициента усиления) // Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике : в 2 т. Л., 1978. Т. 1. С. 73 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А.* Некоторые особенности преобразования лазерного излучения в область вакуумного ультрафиолета на электронном потоке // Там же. С. 60 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А.* Влияние пространственных размеров лазера на электронном пучке на его энергетические характеристики // Лазерные пучки : сб. науч. тр. Хабаровск, 1979. С. 145–153.



3. Зельдович Я. Б. Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением // УФН. 1975. Т.115, вып. 2. С. 161–197. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197502a.0161.
4. Кузнецов В. Л. Лазеры на свободных электронах // УФН. 1979. Т. 129, вып. 3. С. 541–547. DOI: 10.3367/UFNr.0129.197911f.0541.
5. Федоров М. В. Взаимодействие электронов с электромагнитным полем в лазерах на свободных электронах // УФН. 1981. Т. 135, вып. 2. С. 213–236. DOI: 10.3367/UFNr.0135.198110c.0213.
6. Arutyunian F. R., Tumanian V. A. The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams // Phys. Lett. 1963. Vol. 4. P. 176–178. DOI: 10.1016/0031-9163(63)90351-2.
7. Pantell R. H., Soncini G., Puthoff H. E. S-9 – Stimulated Photon-Electron Scattering // IEEE J. Quantum Electronics. 1968. Vol. 4. P. 905–907. DOI: 10.1109/JQE.1968.1074989.
8. Дубровский В. А., Цикин Б. Г. О возможности накопления излучения ОКГ, рассеянного электронным потоком // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 7. С. 1433–1439.
9. Дубровский В. А., Лернер Н. Б., Цикин Б. Г. К теории Комpton-лазера // Квант. электроника. 1975. Т. 2. С. 2292–2302.
10. Соловьев А. П., Цикин Б. Г. Стимулирование медленной электромагнитной волной рассеяния излучения ОКГ электронным потоком // Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 307–309.
11. Дубровский В. А., Цикин Б. Г. Стимулирование рассеяния в Комpton-лазере замедленными волнами (полуклассическая теория) // Квант. электроника. 1977. Т. 4. С. 1473–1481.
12. Zaretskii D. F., Nersesov E. A., Fedorov M. V. Gain in a Compton laser // Sov. Phys. JETP. 1981. Vol. 53. P. 508–512.
13. Fedorov M. V., Nersesov E. A., Zaretskii D. F. On the possibility to optimize the gain of the Compton laser // Phys. Lett. 1981. Vol. 82A. P. 227–228. DOI: 10.1016/0375-9601(81)90192-4.
14. Gover A., Yariv A. Collective and Single-Electron Interaction of Electron Beam with Electromagnetic Waves, and Free-Electron Lasers // Appl. Phys. 1978. Vol. 16. P. 121–138.

#### Образец для цитирования:

Аникин В. М., Цой В. И. Исследования по физике лазеров на свободных электронах в Саратовском университете // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 144–148. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148.

#### Physics of Free-electron Lasers in Saratov State University

##### V. M. Anikin, V. I. Tsoy

Valery M. Anikin, ORCID 0000-0002-6506-6997, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, AnikinVM@info.sgu.ru

Valery I. Tsoy, ORCID 0000-0001-8055-4385, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, tsoyvi@info.sgu.ru

In the early 1970s, Saratov State University carried out research on the creation of a Compton free electron laser. The scientific group was headed by Boris Gennadievich Tsikin, associate professor of the electronics chair. The results of these works were published in central scientific journals and presented at international and all-Union scientific conferences. They received a positive assessment in the review articles published in the journal «Physics-Uspеkhi». The investigations of physicists from SSU are interesting pages in the history of the creation of free-electron lasers. The European free electron X-ray laser, European XFEL (2017) is the latest scientific and technical achievement in this field.

**Key words:** free-electron lasers, Compton-laser, Saratov State University.

#### References

1. V Germanii odkryli samyj moshchnyj rentgenovskij lazer na svobodnyh ehlektronah [In Germany, the most powerful free-electron X-ray laser was discovered]. Available at: <http://tass.ru/nauka/4525693> (accessed 2 December 2017) (in Russian).

2. Mukhin K. N., Sustavnov A. F., Tikhonov V. N. *Rossiiskaya fizika Nobelevskogo urovnya* [Russian physics of Nobel level]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 228 p. (in Russian).
3. Zel'dovich Ya. B. Interaction of free electrons with electromagnetic radiation. *Phys. Usp.*, 1975, vol. 18, pp. 79–98. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197502a.0161
4. Kuznetsov V. L. Free-electron lasers. *Phys. Usp.*, 1979, vol. 22, pp. 934–938. DOI: 10.3367/UFNr.0129.197911f.0541
5. Fedorov M. V. Interaction of electrons with the electromagnetic field in free electron lasers. *Phys. Usp.*, 1981, vol. 24, pp. 801–814. DOI: 10.3367/UFNr.0135.198110c.0213
6. Arutyunian F. R., Tumanian V. A. The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams. *Phys. Lett.*, 1963, vol. 4, pp. 176–178. DOI: 10.1016/0031-9163(63)90351-2
7. Pantell R. H., Soncini G., Puthoff H. E. S-9 – Stimulated Photon-Electron Scattering. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1968, vol. 4, pp. 905–907. DOI: 10.1109/JQE.1968.1074989
8. Dubrovskii V. A., Tsikin B. G. O vozmozhnosti nakopleniya izlucheniya OKG, rasseyannogo electronnym potokom [On the possibility of accumulation of scattering radiation on an electrons flow in an optical quantum generator]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1972, no. 7, pp. 1433–1439 (in Russian).



9. Dubrovskii V. A., Lerner N. B., Tsikin B. G. On the Compton laser theory. *Kvant. Elektronika* [Quantum Electronics], 1975, vol. 2, pp. 2292–2302 (in Russian).
10. Soloviev A. P., Tsikin B. G. Stimulirovanie medlennoi elektromagnitnoi volnoi rasseyaniya izlucheniya OKG elektronnyim potokom [Stimulation of scattering by electrons flow radiation using a slow electromagnetic wave]. *Pis'ma v JTF* [Sov. JTF Lett.], 1977, vol. 3, pp. 307–309 (in Russian).
11. Dubrovskii V. A., Tsikin B. G. Stimulation of scattering in the Compton-laser by decelerated waves (semiclassical theory). *Kvant. Elektronika* [Quantum Electronics], 1977, vol. 4, pp. 1473–1481 (in Russian).
12. Zaretskii D. F., Nersesov E. A., Fedorov M. V. Gain in a Compton laser. *Sov. Phys. JETP*, 1981, vol. 53, pp. 508–512.
13. Fedorov M. V., Nersesov E. A., Zaretskii D. F. On the possibility to optimize the gain of the Compton laser. *Phys. Lett.*, 1981, vol. 82 A, pp. 227–228. DOI: 10.1016/0375-9601(81)90192-4.
14. Gover A., Yariv A. Collective and Single-Electron Interaction of Electron Beam with Electromagnetic Waves, and Free-Electron Lasers. *Appl. Phys.*, 1978, vol. 16, pp. 121–138.

---

**Cite this article as:**

Anikin V. M., Tsoy V. I. Physics of Free-electron Lasers in Saratov State University. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 144–148 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148.

---