



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕГАРМОНИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО СИГНАЛУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА, РАБОТАЮЩЕГО В АВТОДИННОМ РЕЖИМЕ

*А.В. Скрипаль, О.И. Чанилов, Д.А. Усанов, А.С. Камышанский*

Рассмотрена возможность восстановления сложной негармонической функции движения объекта с помощью автодинной интерференционной системы. Приведены результаты эксперимента по определению параметров сложного негармонического движения отражателя. Показано, что применение многоступенчатой цифровой фильтрации полученного в ходе эксперимента автодинного сигнала позволяет снизить влияние шумовых искажений на восстанавливаемый сигнал.

### Введение

Известны гомодинные методы измерения параметров движения колеблющегося отражателя, в которых интерференционная система базируется на схемах интерферометров Фабри – Перо, Майкельсона и Маха – Цендера. Регистрируемый в этих системах сигнал имеет сложную форму и подвержен шумовым искажениям из-за большой длины оптических плеч, создающих разность хода отраженного и опорного лучей.

В качестве интерференционной системы представляет интерес использование автодинной системы с полупроводниковым лазером вследствие предельной простоты ее конструкции. Ранее было показано [1], что при малом значении коэффициента обратной оптической связи ( $C \ll 1$ ) изменение интенсивности излучения, генерируемого автодинной интерференционной системой, подчиняется тем же законам, что и изменение интенсивности излучения в гомодинных системах с развязкой.

Однако фиксируемый автодинный сигнал имеет сложную форму и сильно подвержен шумовым искажениям, возникающим из-за высокой чувствительности автодинной интерференционной системы к вибрациям, а также к помехам в цепях

питания. В связи с этим важную роль играют методы обработки и фильтрации получаемого в ходе эксперимента сигнала.

Целью данной работы является применение автодинной системы для решения задачи о восстановлении негармонической функции движения отражателя и разработка методов фильтрации, позволяющих очистить получаемый в ходе эксперимента интерференционный сигнал от внешних шумовых воздействий.

## 1. Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. С выхода звуковой платы персонального компьютера 1 через кабель 2 на пьезокерамическую пластинку 3 с закрепленным на ней зеркалом подавался заданный негармонический сигнал.

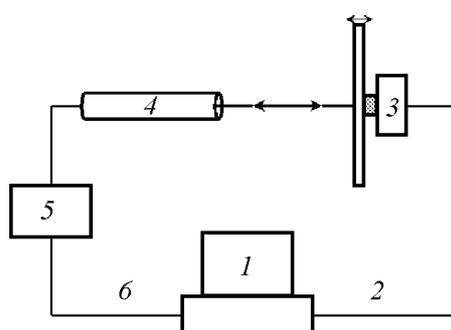


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Пьезокерамическая пластина 3 вместе с оптическим автодином 4 была закреплена на оптической скамье. В автодине в качестве источника излучения оптического диапазона использовался лазерный диод типа RLD-650 на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой, имеющий следующие характеристики: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм, пороговый ток 20 мА. С автодина на колеблющуюся пластину был направлен лазерный луч. Полученный автодинный сигнал через усилитель 5 подавался по кабелю 6 на аналого-цифровой преобразователь персонального компьютера 1. После записи автодинного сигнала производилась его обработка с целью восстановления закона колебания отражателя.

В качестве закона, которым описываются колебания отражателя, была выбрана временная зависимость в виде последовательности, каждая из составляющих которой является гармонической функцией, модулированной по амплитуде убывающей экспоненциальной функцией, что примерно соответствует случаю периодического возбуждения колебаний в контуре с потерями. Экспериментально такая зависимость напряжения от времени реализовалась подачей сигнала описанной формы с выхода звуковой карты персонального компьютера на пьезокерамическую пластину 2, что вызывало механическое смещение по тому же закону закрепленного на пластине зеркала.

Для снижения влияния шумов электрической сети на регистрируемый сигнал в качестве источника питания лазера, работающего в автодинном режиме, использовалась аккумуляторная батарея. Коэффициент отражения колеблющейся пластины и расстояние от пластины до источника излучения были подобраны таким образом, чтобы для коэффициента обратной оптической связи  $C$  выполнялось условие  $C \ll 1$ . Фрагмент зарегистрированного фотоприемником сигнала приведен на рис. 2. Из рисунка видно, что сигнал сильно зашумлен. Это, по-видимому, вызвано помехами в электрической сети и механическими колебаниями экспериментальной установки. Для снижения влияния шума был проведен отдельный эксперимент на той же

установке, когда колебания на пьезокерамическую пластину не подавались. Сигнал, записанный в ходе этого эксперимента, был подвергнут так называемому кратковременному или оконному преобразованию Фурье. По данным кратковременного преобразования Фурье были выделены гармоники, присутствующие в зарегистрированном сигнале на всем протяжении времени, в течение которого регистрировался сигнал. Описанные гармоники были изъяты из спектра автодинного сигнала, полученного от колеблющегося отражателя. Для окончательной фильтрации полученного от колеблющегося отражателя автодинного сигнала использовался цифровой фильтр Савицкого – Голея [2]. Вид отфильтрованного по вышеописанному алгоритму автодинного сигнала приведен на рис. 3.

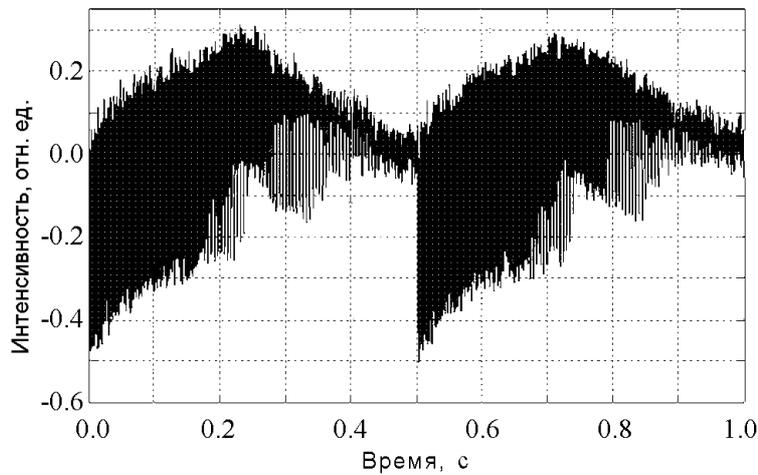


Рис. 2. Фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала

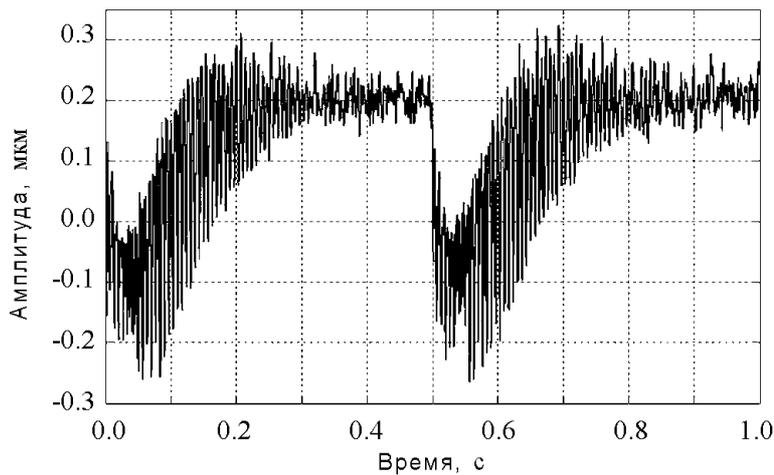


Рис. 3. Фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала после его фильтрации

В ряде работ [3-6] предложены различные методы дешифровки выходного интерференционного сигнала гомодинной интерференционной системы. Большинство из этих методов строится в предположении, что исследуемый объект колеблется по гармоническому закону. В работе [7] изложен метод восстановления функции движения объекта в гомодинной системе, позволяющий по интерференционному сигналу восстанавливать закон движения объекта, имеющий полигармонический характер, а также продемонстрирована возможность восстановления параметров движения зеркала, колеблющегося по бигармоническому закону. В настоящей работе рассмотрена возможность использования такого метода для восстановления функции движения колеблющегося объекта, описанной заданным выше законом.

## 2. Метод восстановления функции движения колеблющегося объекта

Рассмотрим нормированную переменную составляющую интерференционного сигнала, полученного в гомодинной лазерной системе с колеблющимся внешним отражателем. Как показано в работах [7, 8], ее можно записать в следующем виде:

$$U(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $\theta$  – фаза сигнала;  $\lambda$  – длина волны лазера;  $f(t)$  – функция, характеризующая продольные движения объекта

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu. \quad (2)$$

Здесь  $\nu$  – частота,  $c(\nu)$  – комплексные коэффициенты Фурье-разложения функции  $f(t)$ .

Проведя дифференцирование интерференционного сигнала (1) с учетом представления (2), введем в рассмотрение функцию  $S(t)$ , такую чтобы ее спектр с точностью до постоянного множителя соответствовал спектру восстанавливаемого сигнала

$$S(t) = \frac{dU/dt}{\sqrt{1 - U^2(t)}}. \quad (3)$$

Используя интегральное представление (2), можно показать, что

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} i \frac{8\pi^2\nu}{\lambda} c(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu. \quad (4)$$

Для определения знака функции  $\pm\sqrt{1 - U^2(t)}$  можно использовать следующую процедуру. По функции  $U(t)$  вычисляются значения  $\sqrt{1 - U^2(t)}$ . В первой точке знак квадратного корня задается произвольно. Затем определяется знак функции  $dU/dt$ , и при построении  $\pm\sqrt{1 - U^2(t)}$  ее знак меняется на противоположный в тех точках, где  $dU/dt$  равна нулю. Если полученная таким образом функция имеет разрывы, тогда на участке между разрывами знак функции изменяется на противоположный. Выполнение этой процедуры ведет к получению непрерывной функции  $\pm\sqrt{1 - U^2(t)}$  с учетом знака.

Сравнив интегральные представления функций  $f(t)$  и  $S(t)$  (выражения (2) и (4), соответственно), можно заметить, что спектральные плотности этих функций отличаются множителем  $i\frac{8\pi^2v}{\lambda}$ . Таким образом, построив на основе экспериментальных данных функцию  $S(t)$ , можно определить комплексные коэффициенты Фурье-разложения функции  $f(t)$

$$c(v) = i\frac{8\pi^2v}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau) \exp(-i2\pi v\tau) d\tau \quad (5)$$

и, воспользовавшись представлением (2), восстановить функцию  $f(t)$ .

Необходимо отметить, что в приведенном алгоритме определения знака функции  $\sqrt{1 - U^2(t)}$  делается произвольное предположение об ее знаке в нулевой момент времени. Это приводит к тому, что мы можем определить вид функции, описывающей только движение объекта, но не направление движения. Поэтому описанный метод может быть с успехом использован в случаях, когда интерес представляет только зависимость величины смещения объекта от времени, а направление движения не является существенным.

### 3. Численное моделирование

Для проверки описанного выше способа восстановления функции движения объекта нами было проведено численное моделирование восстановления заданной функции движения внешнего отражателя. В ходе моделирования задавалась функция  $f(t)$ , по которой с учетом выражения (1) и рассчитывался интерференционный сигнал  $U(t)$ . Затем вычислялась функция  $S(t)$  и решалась обратная задача: проводилось восстановление сигнала с использованием изложенной выше методики.

В качестве тестовой задачи была задана функция движения объекта  $f(t)$ , состоящая из трех гармоник на частотах 5, 17 и 30 Гц. В ходе моделирования по этой функции вычислялся нормированный интерференционный сигнал, относительно которого затем решалась обратная задача.

Основная трудность, возникшая в ходе численного моделирования восстановления закона движения объекта, заключалась в наличии разрывов у конструируемой из интерференционного сигнала функции  $S(t)$ . На рис. 4 приведен вид функции  $S(t)$ , рассчитанной в ходе моделирования по формуле (3). Из рисунка видно, что  $S(t)$  имеет разрыв в некоторые моменты времени  $t_0$ . Эти разрывы обусловлены обращением в нуль функции  $\pm\sqrt{1 - U^2(t)}$ . Использование такой  $S(t)$  приводит к неправильно-му восстановлению искомого сигнала. Для корректного восстановления  $f(t)$  нами применялись алгоритмы фильтрации и сглаживания к функции  $S(t)$ . В ходе моделирования последовательно использовалась фильтрация сигнала по амплитуде (сигнал обращался в нуль в тех точках, в которых его значение по модулю превышало заданное значение, определенное по участкам функции  $S(t)$ , не имеющим разрывов), медианная фильтрация по пяти точкам и последующее сглаживание кубическими сплайнами. На рис. 5 приведен вид функции  $S(t)$  после обработки вышеуказанным способом. Видно, что применение описанной цифровой обработки сигнала позволяет в рассматриваемом случае получить непрерывную функцию  $S(t)$ .

Далее в ходе моделирования по непрерывной функции  $S(t)$  с использованием выражений (5) и (2) производилось восстановление искомого функции движения

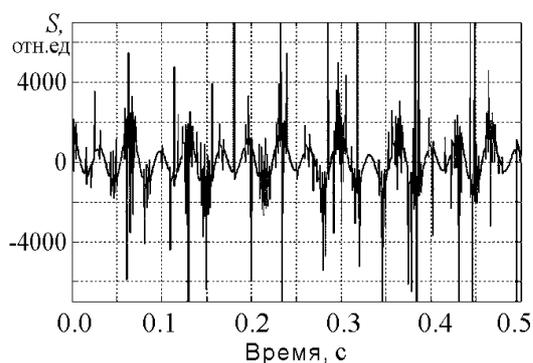


Рис. 4. Вид функции  $S(t)$  до фильтрации

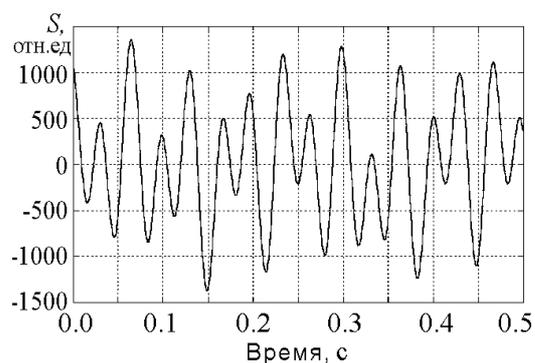


Рис. 5. Вид функции  $S(t)$  после фильтрации

объекта и сравнение восстановленной функции с заранее заданной. Сравнение показывает, что отклонения значений восстановленной функции движения отражателя от значений заранее заданной функции не превышают 6 процентов. На наш взгляд, обсуждаемая погрешность вызвана применением интерполяции значений функции  $S(t)$  в местах ее разрывов.

Таким образом, результаты численного моделирования показали возможность применения описанного выше метода решения обратной задачи в гомодинной интерференционной системе для случая, когда восстанавливаемая функция движения объекта имеет более сложный, чем это было описано в [7], вид.

#### 4. Результаты обработки экспериментального автодинного сигнала

Зафиксированный в ходе эксперимента интерференционный сигнал после цифровой фильтрации был подвергнут описанным выше преобразованиям с целью решения обратной задачи – восстановления функции движения отражателя. Вид исходного и восстановленного сигналов показан на рис. 6, 7, соответственно. Сравнение ча-

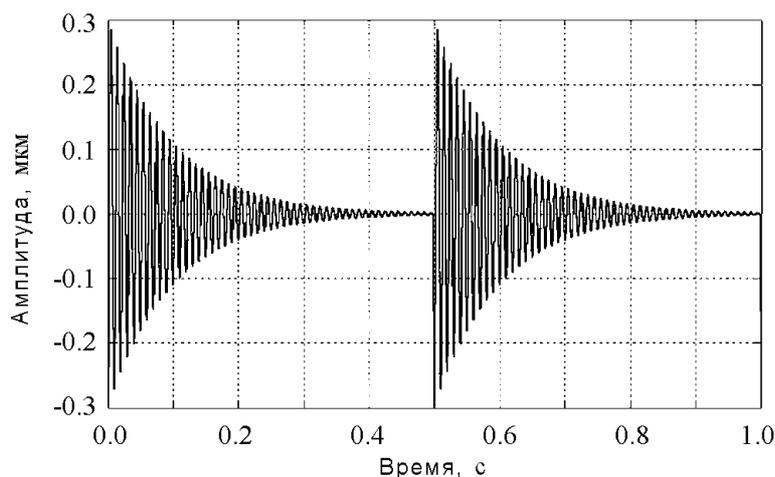


Рис. 6. Исходный закон движения отражателя

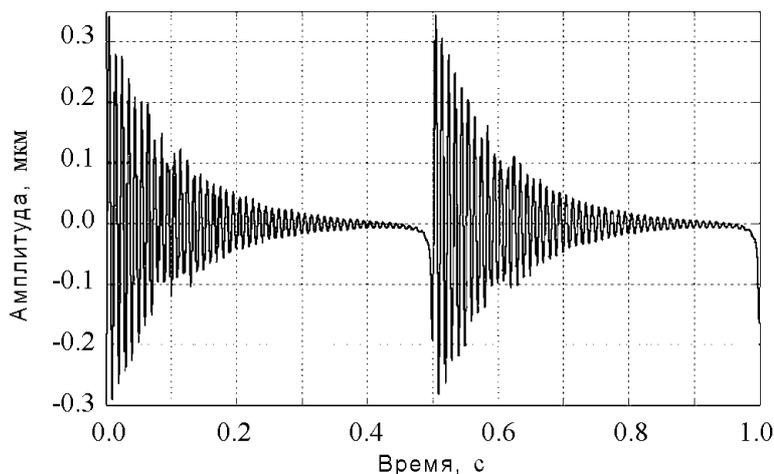


Рис. 7. Восстановленный закон движения отражателя

стоты экспоненциально убывающих гармонических колебаний исходного и восстановленного сигналов показало, что разность частот находится в пределах погрешности измерений. На рис. 8 представлены зависимости логарифмического декремента затухания  $d = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)$ , где  $A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитудные значения экстремумов исследуемой функции исходного и восстановленного сигналов, соответственно, от номера максимума  $n$  для первых 47 максимумов. Из рисунка видно, что декремент затухания восстановленного сигнала осциллирует относительно декремента затухания исходного сигнала. При этом среднее значение декремента затухания восстановленного сигнала, вычисленное по всем максимумам, отличается от среднего значения декремента исходного сигнала на 4,3 процента. Таким образом, можно сделать вывод, что восстановленный сигнал с высокой степенью точности соответствует исходному.

Наибольшая погрешность восстановления относится к тем моментам времени, когда уровень сигнала становился сравнимым с уровнем шумов измерительной системы, а также в начальные моменты возбуждения колебаний. При этом погрешности восстановления в начальные моменты связаны с тем, что при восстановлении формы колебаний производилась фильтрация и интерполяция функции  $S(t)$  в целях исключения ее разрывов, что вызвало сглаживание обсуждаемой функции в моменты возбуждения колебаний. Такое сглаживание функции  $S(t)$  вызвало искажение восстановленного сигнала по сравнению с исходным в обсуждаемые моменты времени.

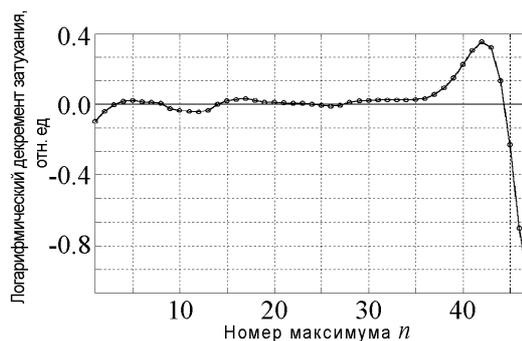


Рис. 8. Зависимость логарифмического декремента затухания для исходного (сплошная линия) и восстановленного (линия с кружками) сигналов от номера максимума

## Заклучение

Таким образом, показана возможность определения вида функции движения внешнего отражателя с помощью автодинной системы с полупроводниковым лазером для случая, когда колебания представляют собой последовательность, каждая из составляющих которой является гармонической функцией, модулированной по амплитуде экспоненциально убывающей функцией. Предложено использовать предварительную фильтрацию автодинного сигнала от шумов для повышения точности восстановления функции, описывающей движение объекта, имеющее сложный характер. Использование описанных методов очистки от шумов автодинного сигнала и его обработки позволяет с высокой степенью точности восстанавливать сложное негармоническое движение объекта, имеющее периодический характер. Показано, что восстановленный по результатам измерений сигнал имеет высокую степень соответствия исходному.

## Библиографический список

1. *Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов. 2003. 308 с.
2. *Savitzky A., Golay M.* // *Anal. Chem.* 1964. Vol.36, № 8. P. 1627-1635.
3. *Suemoto Y.* Laser heterodyne and homodyne measurements of impulsive displacement // *Opt. Commun.* 1990. Vol. 75, № 3-4. P. 201-208.
4. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А., Васильев М. Р.* Гомодинные методы измерения // *Зарубеж. радиоэлектрон.* 1995. № 6. С. 135-141.
5. *Jin W., Zhang L. M., Uttamchandani D., Culshaw B.* Modified J1 ... J4 method for linear readout of dynamic phase changes in a fiber-optic homodyne interferometer // *Appl. Opt.* 1991. Vol. 30, № 31. P. 4496-4502.
6. *Wang Y., Chiang F.-P.* New moire interferometry for measuring three dimensional displacements // *Opt. Eng.* 1994. Vol. 33, № 8. P. 2654-2661.
7. *Гагнус С. В., Скрипаль А. В., Усанов Д.А.* Определение параметров движения объекта с помощью оптического гомодинного метода // *Автометрия.* 1999. № 1. С. 31-37.
8. *Wang Z., Graca M. S., Bryanston Cross P. J., Whitehouse D. J.* Phase-shifted image matching algorithm for displacement measurement // *Opt. Eng.* 1996. Vol. 35, № 8. P. 2327-2331.

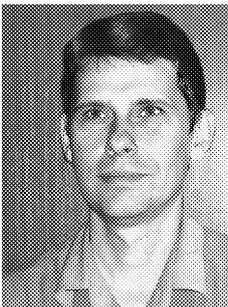
*Саратовский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 12.11.2004*

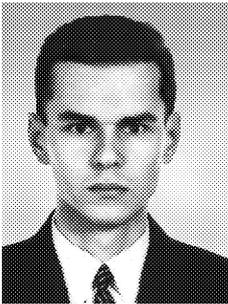
## RECONSTRUCTION OF UNHARMONIC MOTION FUNCTION OF SUBJECT BY SEMICONDUCTOR LASER SIGNAL OPERATING IN AUTODYNE REGIME

*A.V. Skripal, O.I. Chanilov, D.A. Usanov, A.S. Kamyshanskiy*

The possibility of reconstruction of complex unharmonic motion function of subject was investigated using autodyne interference system. Experimental results of parameter determination of complex unharmonic motion of reflector were presented. It was shown that application of manystages digital filtration of autodyne experimental signal allows to decrease influence of noise distortion on reconstruction signal.



*Скрипаль Анатолий Владимирович* – родился в Саратове (1960). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1982), защитил диссертацию на звание кандидата физико-математических наук по специальности «Оптика» (1991) и доктора физико-математических наук (1998). Профессор кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета. Автор более 100 научных трудов в области когерентной оптики, вибродиагностики и квантовой электроники.



*Чанилов Олег Игоревич* – родился в Саратове (1980), окончил Саратовский государственный университет (2002). Аспирант кафедры физики твердого тела физического факультета СГУ. Автор 6 публикаций в отечественной и зарубежной печати. Область научных интересов - интерферометрия, цифровая обработка сигналов.



*Усанов Дмитрий Александрович* – родился в г. Менделеевске (1943), окончил Саратовский государственный университет (1965), куда после нескольких лет службы на предприятии электронной промышленности поступил на работу и где работает заведующим кафедрой физики твердого тела по настоящее время. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области физики полупроводников и диэлектриков (1972) и доктора физико-математических наук в области радиофизики, включая квантовую радиофизику (1989). Профессор СГУ, академик МАН ВШ, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов - твердотельная СВЧ-электроника, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике СВЧ. Автор многих статей, патентов и изобретений по указанным выше направлениям.  
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru



*Камышианский Антон Сергеевич* – родился в Саратове (1980), окончил Саратовский государственный университет (2003). Аспирант кафедры физики твердого тела физического факультета СГУ. Автор 9 публикаций в отечественной и зарубежной печати. Область научных интересов - лазерная физика, лазерные автодинные системы и их применение, медицинская диагностика.