

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ЛАЗЕРНОГО
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА, ОСНОВАННЫЙ НА
АЛГОРИТМАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

студента 4 курса 4051 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Шарапова Якова Сергеевича

Научный руководитель:

доцент, к.ф.-м.н., доцент
должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

С.Ю. Добдин
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого
тела:

д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

Ал.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Введение. Данная дипломная работа посвящена изучению и анализу существующих методов измерения нановибраций, основанных на использовании лазера, разработке метода анализа лазерного интерференционного сигнала при помощи алгоритмов машинного обучения, а также проведению эксперимента по измерению нановибраций с использованием автодинной установки с последующей обработкой результатов для поиска амплитуды колебаний.

Развитие современных технологий требует непрерывного контроля над различными параметрами, что обуславливает бесконтактных методов измерения, так как возникают ситуации, когда контактные методы невозможны или не подходят ввиду различных причин. Среди бесконтактных методов особое место занимает так называемая “самосмешивающаяся лазерная интерферометрия”.

Это интерферометрический метод, при котором часть света, отраженного вибрирующей мишенью, отражается в лазерный резонатор, вызывая модуляцию как по амплитуде, так и по частота излучаемого оптического луча. Таким образом, лазер становится чувствительным к расстоянию, пройденному отраженным лучом, становясь датчиком расстояния, скорости или вибрации.

Возможность точного определения смещения исследуемого объекта, а также параметров его вибрации привело к широкому распространению в сфере медицины и производства.

Преимущество, по сравнению с традиционной системой измерения, заключается в более низкой стоимости благодаря отсутствию коллимационной оптики и внешних фотодиодов. Однако данный метод не лишён недостатков, а именно – достаточно “громоздкие” вычисления, которые необходимо проводить для точного определения параметров исследования объекта.

Цель работы: разработать метод регистрации и анализа лазерного интерференционного сигнала, основанный на алгоритмах машинного обучения.

Поставленные задачи:

1. Провести критический анализ методов определения параметров микро- и нановибраций.
2. Провести компьютерное моделирование, собрать базу данных для обучения алгоритмов. Проанализировать результаты.
3. Экспериментально определить амплитуды вибраций внешнего отражателя, используя полупроводниковый лазерный автодин и алгоритмы машинного обучения.

Бакалаврская работа содержит 6 глав:

1. Лазеры

- 1.1 Принцип действия лазеров
- 1.2 Конструкция лазеров
 - 1.2.1 Активные среды лазеров
 - 1.2.2 Источник накачки
 - 1.2.3 Оптический резонатор
 - 1.2.4 Типы лазеров

2. Известные методы измерения вибраций

- 2.1 Контактные методы
 - 2.1.1 Пьезоэлектрические датчики
 - 2.1.2 Открытый резонатор
- 2.2 Бесконтактные методы
 - 2.2.1 Лазерная интерферометрия
 - 2.2.2 Гомодинный метод
 - 2.2.3 Гетеродинный метод
 - 2.2.4 Полупроводниковый лазерный автодин
 - 2.2.5 Лазерный доплеровский виброметр
 - 2.2.6 Голографический метод
 - 2.2.7 Спекл-интерферометрический метод

3. Алгоритмы машинного обучения

- 3.1 Линейная регрессия
- 3.2 Случайный лес
- 3.3 Бустинг

4. Компьютерное моделирование

- 4.1 Модель автодинного сигнала

4.2 Машинное обучение

5. Экспериментальное определение амплитуды нановibrаций

5.1 Установка

5.2 Экспериментальное определение амплитуды нановibrаций

6. Сравнение результатов машинного обучения и эксперимента

Основное содержание

Первый раздел: описываются принцип действия лазера, конструкция лазеров и их типы.

Второй раздел посвящен рассмотрению контактных и бесконтактных методов измерения вибраций.

Третий раздел содержит описания принципов алгоритмов машинного обучения, использованных в работе.

В четвёртом разделе описывается компьютерное моделирование, позволяющее собрать значения гармоник автодинного сигнала в базу данных. Так же в разделе описано обучение алгоритмов машинного обучения и его результаты.

Для задания траектории движения исследуемого объекта использовалась формула:

$$f = A * \sin(2\pi vt)$$

Где A – амплитуда колебаний,

v – частота колебаний,

t – время колебаний.

Для задания автодинного сигнала использовалась формула:

$$P = \cos\left(\theta + \frac{4\pi f}{\lambda}\right)$$

Где θ – набег фазы автодинного сигнала,

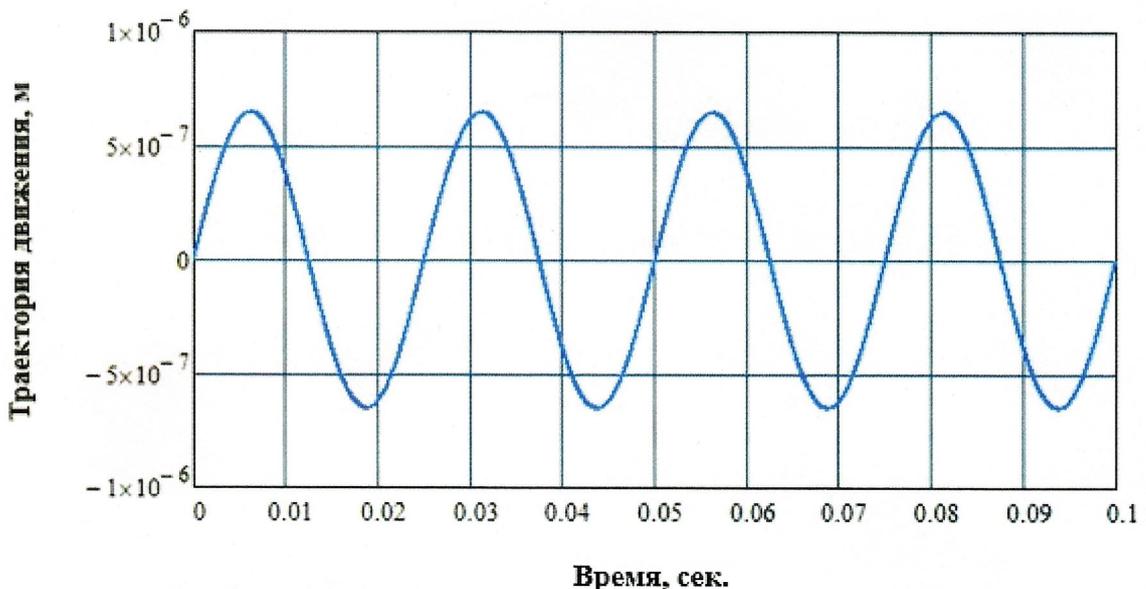
λ –длина волны лазерного излучения,

f – заданная ранее функция, описывающая траекторию движения внешнего отражателя.

С полученного сигнала получаем спектр с помощью преобразования Фурье. Находим последнюю пиковую гармонику. Записываем её значение, а также значения двух гармоник с правой стороны от пиковой и двух гармоник слева. Проводим данные манипуляции при различных значениях амплитуды колебаний внешнего отражателя. Из полученных значений, а также значения амплитуды составляем базу данных.

При компьютерном моделировании сигнала полупроводникового лазерного автодина были использованны следующие параметры: длина волны излучения полупроводникового лазера составила $\lambda = 655\text{нм}$, а частота модуляции тока питания лазерного диода $\nu = 100\text{ Гц}$, набег фазы автодинного сигнала $\theta = \left[-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}\right]$ с шагом в $\frac{\pi}{0.5}$.

На рисунке 1(а) представлен график функции, описывающей колебания измеряемого объекта. Пример смоделированного автодинного сигнала показан на рисунке 1(б) и его спектр на рисунке 1(в). Пример значений базы данных показан на рисунке 2.



а)

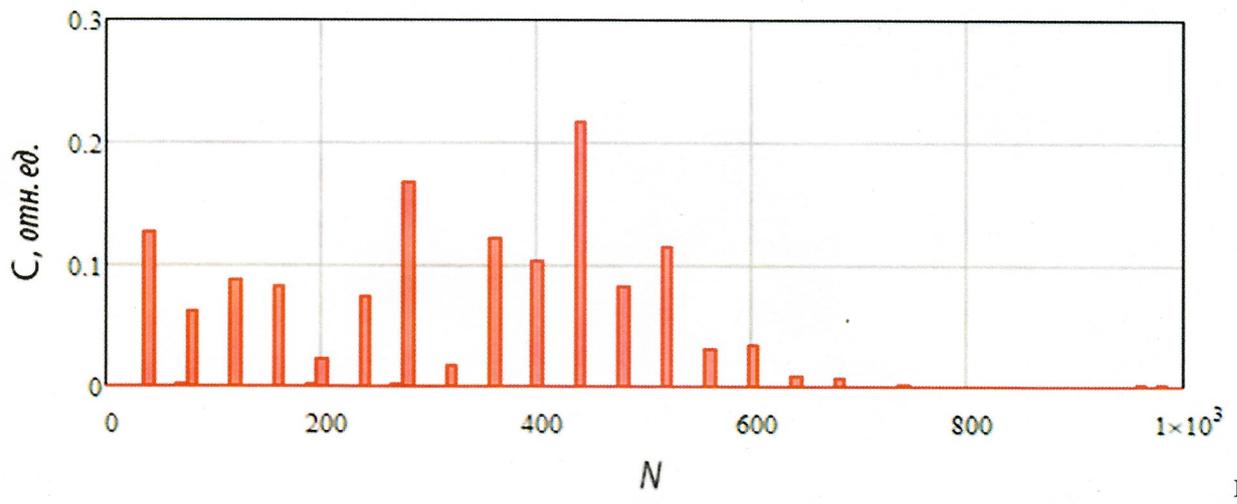
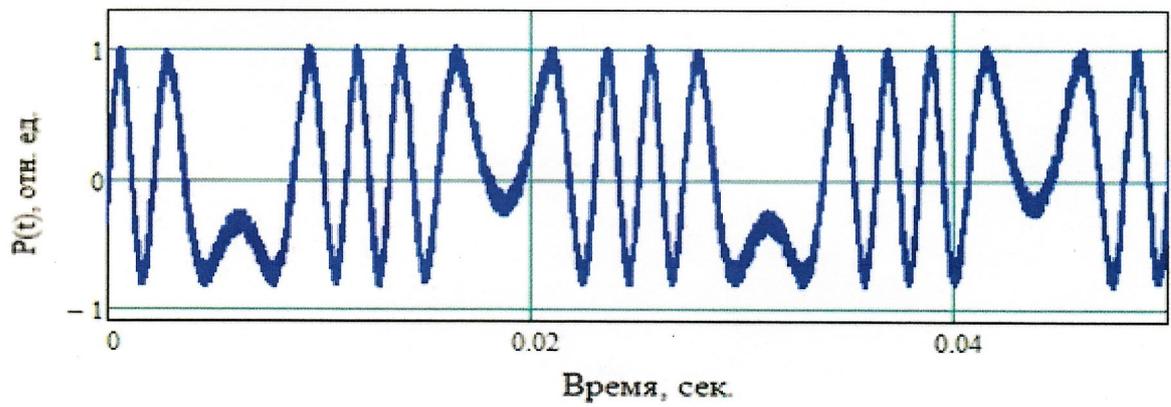


Рисунок 1 – Колебания объекта (а), смоделированный частотно-модулированный автодинный сигнал (б) и его спектр (в).

A-2	A-1	A	A+1	A+2	A0
0.10305	0.21535	0.30713	0.22126	0.11223	0.22
0.14601	0.17401	0.30375	0.23901	0.12957	0.23
0.18217	0.12946	0.29463	0.25447	0.14749	0.24
0.21061	0.082961	0.27979	0.26705	0.16563	0.25
0.035822	0.25941	0.2762	0.18357	0.091799	0.26
0.010617	0.23382	0.28145	0.20085	0.10629	0.27
0.055039	0.20357	0.28241	0.21701	0.12156	0.28
0.096189	0.16933	0.2788	0.23155	0.13737	0.29
0.13292	0.13192	0.27044	0.24398	0.15346	0.30

Рисунок 2 – База данных, где A – значение пиковой гармоники, A-2, A-1, A+1, A+2 – значение соседних гармоник, A0 – значение амплитуды.

Следующим этапом в работе стало обучение машинных алгоритмов на полученной базе данных. Использовались следующие алгоритмы:

1. Линейная регрессия;
2. GradientBoostingRegressor;

3. Случайный лес;
4. HistGradientBoostingRegressor;
5. CatBoostRegressor.

В условиях задачи лучшие результаты показали Hist Gradient Boosting, Random Forest Regressor, Cat Boost Regressor, от остальных было решено отказаться. Коэффициент детерминации данных алгоритмов представлен в таблице 1, а в таблице 2 представлены результаты определения амплитуды вибрации пьезокерамики по спектрам, полученным в ходе экспериментальной части.

Таблица 1 – Метрики R^2 , полученные в результате работы алгоритмов.

Алгоритм	Коэффициент детерминации (R^2)
HistGradientBoostingRegressor	0.8767
Random Forest Regressor	0.9994
CatBoostRegressor	0.9995

Таблица 2 – Результаты вычисления амплитуды.

Источник	Амплитуда, нм		
	Hist Gradient Boosting	490	570
Random Forest Regressor	420	490	550
Cat Boost Regressor	590	670	760

В пятом разделе описывается экспериментальная установка получение значений амплитуды нановибраций внешнего отражателя.

Экспериментальная установка состоит из полупроводникового лазерного автодина на базе диода RLD-650 (1) с длиной волны 655нм и дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой. Излучение полупроводникового лазера направлялось на поверхность объекта (4), вибрирующей пьезокерамики, закрепленной на шаговом трансляторе (5). Управление вибрацией осуществлялось с помощью генератора сигналов на базе NIELVIS (3). Ток питания лазерного диода изменялся путём изменения напряжения питания, подаваемого с LD драйвера (2) управляющего током

питания. После отражения от поверхности объекта излучение попадает на фотоприемник (6). В дальнейшем сигнал усиливается (7) и фильтруется (8), после чего поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (9) соединенного с персональным компьютером (10).

Целью эксперимента было определение амплитуды нановибраций. Для этого бы ли зарегистрированы автодинные сигналы при разных амплитудах вибрации пьезокерамики, пример сигнала представлен на рисунке 3.

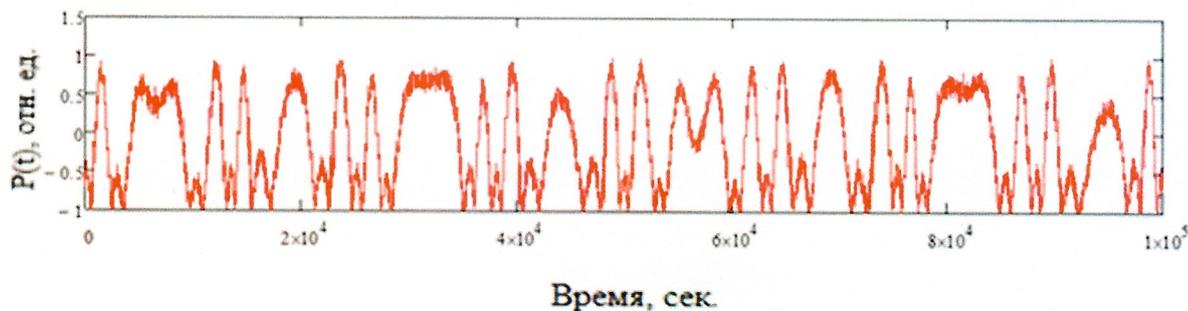


Рисунок 3 – Автодинный сигнал снятый в ходе эксперимента.

Для полученных автодинных сигналов были построены спектры. Пример спектра автодинного сигнала представлен на рисунке 4.

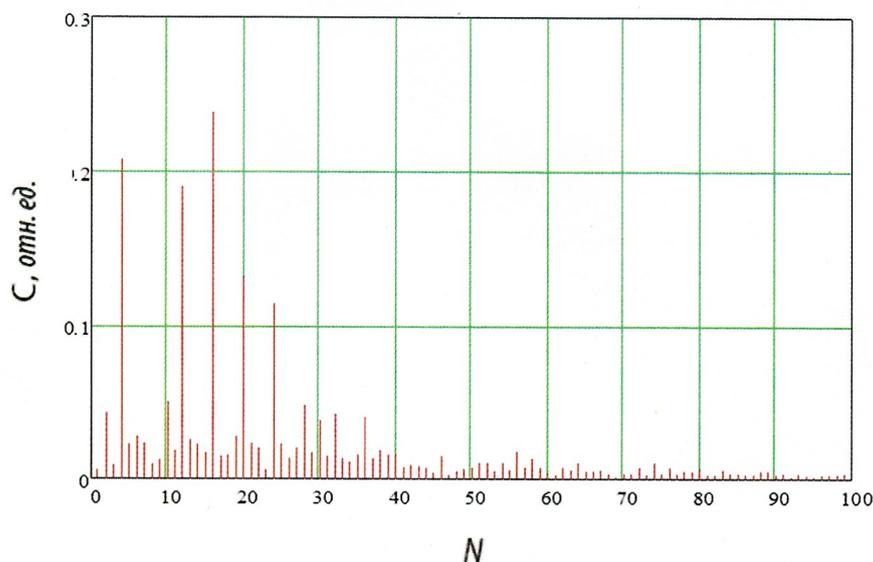


Рисунок 4 – Спектр построенный по экспериментальным измерениям.

Значения гармоник зарегистрированных автодинных сигналов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения гармоник зарегистрированных сигналов.

Сигнал	A-2	A-1	A	A+1	A+2
а	0.069048	0.090531	0.16745	0.16131	0.071435
б	0.085218	0.061724	0.24048	0.091607	0.10877
в	0.10227	0.064394	0.15228	0.065641	0.12859

Полученные параметры позволяют определить амплитуду нановибрации исследуемого объекта при помощи метода ряда гармоник “J1..J4”. Рассчитанные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты вычисления амплитуды.

Сигнал	Амплитуда, нм
а	600
б	670
в	780

Шестой раздел посвящен сравнению результатов определения амплитуды нановибраций, полученных при помощи метода “J1..J4”, принятого за эталон, и в результате работы алгоритмов машинного обучения.

В таблице 5 представлены результаты работы алгоритмов машинного обучения, а так же результаты метода “J1..J4”. Вычисления проводились на одинаковых значениях гармоник автодинного сигнала.

Таблица 5 – Результаты вычисления амплитуды.

Источник	Амплитуда, нм		
	600	670	780
Метод “J1..J4”	600	670	780
Hist Gradient Boosting	490	570	670
Random Forest Regressor	420	490	550
Cat Boost Regressor	590	670	760

Как видно из таблицы, результаты CatBoostRegressor близки к результатам метода ряда гармоник, который принят как эталонный, в то время

как HistGradientBoosting и RandomForestRegressor имеют с ним значительные расхождения.

Заключение.

В ходе выполнения курсовой работы были получены следующие результаты:

1. Проведено компьютерное моделирование, позволяющее получить автодинный сигнал при различных значениях амплитуды колебаний исследуемого объекта.
2. Созданы и проанализированы алгоритмы на основе машинного обучения с целью определения амплитуды нановибраций пьезокерамики.
3. Определены амплитуды нановибраций исследуемой пьезокерамики.
4. Произведено сравнение результатов определения амплитуды с помощью различных методов.

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены следующие значения амплитуд: 600, 670, 780нм. Наиболее близкие результаты показал метод CatBoostRegressor, а рассчитанные им значения амплитуд составили: 590, 670 и 760нм соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пойзнер Б.Н. Физические основы лазерной техники: Учебное пособие. / Б.Н. Пойзнер: Томский государственный университет, 2006. 210 с.
2. Крылов К.И. Основы лазерной техники: Учеб. пособие для студентов приборостроительных спец. Вузов/ К.И. Крылов В.Т. Прокопенко В.А. Тарлыков – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 316 с.
3. Голубев В.С. Лазерная техника и технология. / В. С. Голубев, Ф. В. Лебедев; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. Шк., 1987. 176 с.
4. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск./ Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с.
5. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия в 5 т. Т. 1 / А.М. Прохоров 1988г. 705 с.
6. Мозурас А.В., Паташене Л.Р., Рагульскис К.М., Славицкас С.Б., Макеев В.П. Новая конструктивная схема построения пьезоэлектрических акселерометров, "Вибрационная техника". МДНТП, 1976, С.8.
7. Добряков В.А., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Лазерный Интерферометр как элемент информационно -измерительной системы для прецизионного металлообрабатывающего оборудования // СГТУ, 2007. 22с
8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Гангнус С.В. Решение обратной задачи для восстановления параметров сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 2001. С. 117-122
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Вагарин В.А., Васильев М.Р. Гомодинные методы измерения // Зарубеж. Радиоэлектрон, 1995. № 6. С. 135-141.
10. Усанов Д.А., Гангнус С.В., Скрипаль А.В. Определение параметров движений объекта с помощью оптического гомодинного метода // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 1999. С. 31-37

11. Вагарин В.А., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Измерение негармонических вибраций спектральным гомодинным методом. // Всероссийская Академия Наук Сибирское Отделение. №1, 2000. С. 28-35
12. Чанилов О.И. Определение параметров движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье- и вейвлет-преобразований / О.И. Чанилов 2005. С. 114
13. Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. 2006. Т.62. С. 14-37.
14. Годуа П.А. Метрология в нанотехнологии // ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума», г. Москва, 2006 г. С. 69
15. Кузин А.Ю., Марютин В.Н., Календин В.В. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне. // Нано и микросистемная техника. 2001. №4. С. 49-51.
16. Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера. // Известия Саратовского университета Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 3. С. 14-18.
17. Федосов И.В. Лазерный доплеровский анемометр // СГУ, 2008. С. 19
18. Старчак А.С., Шкретов А.М. Лазерные доплеровские измерители скорости длины протяжённых объектов // Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. С. 12
19. Клименко, И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия // Москва : Наука, 1985. 222 с.
20. Усанов Д.А., Скрипаль Ан. В., Добдин С.Ю. Определение ускорения при микро-и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантово-размерных структурах // Письма в ЖТФ. 2010. Т.36. №21. С. 78-84.

21. УсановД.А., СкрипальАн. В., СкрипальАл. В.Лазерные автодинные технологии для анализа нано- и биомедицинских структур // Издательство Саратовского университета. 2008. С. 43-45.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, connected strokes. The signature is positioned in the upper right quadrant of the page.