

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
№ 24.1.128.01 (Д 002.207.XX), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ ИМ. Л. Д. ЛАНДАУ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 28.03.2025 № 5

О присуждении Хохлову Виктору Александровичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени» по специальности 1.3.3 – теоретическая физика принята к защите 13.12.2024 (протокол заседания № 1) диссертационным советом № 24.1.128.01 (Д 002.207.XX), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук по адресу 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-т акад. Семенова, д. 1А приказом № 1309/нк от 22.06.2023.

Соискатель Хохлов Виктор Александрович, 25.11.1952 года рождения. В 1990 году защитил диссертацию «К теории неустойчивости лазерного испарения конденсированных веществ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете, созданном на базе Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук, работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН). Диссертация выполнена в секторе Плазмы и лазеров ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН. Диссертация представлена к защите

впервые.

Официальные оппоненты:

1. Левашов Павел Ремирович - доктор физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), заведующий теоретическим отделом;
2. Кудряшов Сергей Иванович - доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова, в.н.с., зав. лаб.;
3. Рогалин Владимир Ефимович - доктор физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН), зав. лаб.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Чел ГУ»), Челябинск, в своем положительном отзыве, составленном Майером Александром Евгеньевичем заведующим кафедрой Общей и теоретической физики, д. ф.-м. н., доцентом., и подписанным проректором по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет», кандидатом химических наук, доцентом Бирюковым Александром Игоревичем указала, что диссертация В.А.Хохлова посвящена разработке теоретических моделей двухтемпературной гидродинамики при накачке электронной подсистемы металла или диэлектрика энергией лазерного излучения на временах, меньших времени электрон-ионной релаксации, а также применению разработанных моделей для анализа воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени. Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований

разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теоретической физики, а именно теоретическое описание начальных стадий воздействия ультракоротких импульсов лазерного излучения на твердые мишени на основе двухтемпературной гидродинамики. Полученные в диссертационной работе результаты обладают научной новизной и вносят вклад в развитие теоретической физики в части изучения экстремальных состояний конденсированного вещества и физических явлений в нем, включая кинетику фазовых переходов при воздействии мощного короткоимпульсного лазерного излучения, как примера сильно неравновесной системы. Материал в диссертационной работе Хохлова В.А. изложен ясно, результаты представлены четко, проиллюстрированы информативными рисунками. Автореферат очень подробно и в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

В. А. Хохлов имеет 140 опубликованных работ.

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 статьях в журналах, индексируемых Web of Science: Core Collection и в 7 статьях в сборниках конференций. Из статей в индексируемых Web of Science: Core Collection журналах 7 опубликовано российских журналах, 9 международных журналах уровня Q1, Q2:

1. С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К. Нишихара, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, *Разлет вещества и образование кратера при абляции под действием ультракороткого лазерного импульса*, ЖЭТФ, **130**, 212-227 (2006).
2. S.I. Anisimov, N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovskii, K. Nishihara, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, *Interaction of short laser pulses with metals at moderate intensities*, Appl. Phys. A, **92**, 939-943 (2008).
3. N.A. Inogamov, V.A. Zhakhovskii, S.I. Ashitkov, V.A. Khokhlov, Yu.V. Petrov, P.S. Komarov, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, K. Nishihara, *Two-temperature relaxation and melting after absorption of femtosecond laser*

pulse, Appl. Surf. Sci, **255**, 9712-9716 (2009).

4. N.A. Inogamov, V.A. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V.A. Khokhlov, S.I. Ashitkov, K.V. Khishchenko, K.P. Migdal, D.K. Ilnitsky, Y.N. Emirov, P.S. Komarov, C.W. Miller, I.I. Oleynik, M.B. Agranat, A.V. Andriyash, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, *Electron-Ion Relaxation, Phase Transitions, and Surface Nano-Structuring Produced by Ultrashort Laser Pulses in Metals*, Contrib. Plasma Phys, **53**, 796-810 (2013).
5. N.A. Inogamov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, V.A. Zhakhovskii, Yu.V. Petrov, I.Yu. Skobelev, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, *Spallative Ablation of Metals and Dielectrics*, Contrib. Plasma Phys, **49**, No. 7-8, 455-466 (2009).
6. N.A. Inogamov, V.A. Zhakhovsky, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, I.Yu. Skobelev, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, Yu.V. Petrov, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, *Spallative ablation of dielectrics by X-ray laser*, Appl. Phys. A, **101**, 87-96 (2010).
7. N.A. Inogamov, A.Ya. Faenov, V.A. Zhakhovsky, T.A. Pikuz, I.Yu. Skobelev, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Y. Fukuda, M. Kando, T. Kawachi, M. Nagasono, H. Ohashi, M. Yabashi, K. Tono, Y. Senda, T. Togashi, T. Ishikawa. *Two-Temperature Warm Dense Matter Produced by Ultrashort Extreme Vacuum Ultraviolet-Free Electron Laser (EUV-FEL) Pulse*, Contrib. Plasma Phys, **51**, 419-426 (2011).
8. Н.А. Иногамов, С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, А.Ю. Фаенов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, В.Е. Фортов, И.Ю. Скобелев, Ю. Като, Т.А. Пикуз, В.В. Шепелев, Ю. Фукуда, М. Танака, М. Кишимото, М. Ишино, М. Нишикино, М. Кандо, Т. Кавачи, М. Нагасоно, Н. Охашаи, М. Ябашаи, К. Тано, Ю. Сенда, Т. Тогаши, Т. Ишикава, *Абляция диэлектриков под действием коротких импульсов рентгеновских плазменных лазеров и лазеров на свободных электронах*, Оптический журнал, **78**(8), 5-15 (2011).

9. М.Б. Агранат, С.И. Анисимов, С.И. Ашитков, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, П.С. Комаров, А.В. Овчинников, В.Е. Фортов, В.А. Хохлов, В.В. Шепелев, *Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких темпов растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов*, Письма в ЖЭТФ, **91**, 517-523 (2010).

10. Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, В.В. Шепелев *Сверхупругость и распространение ударных волн в кристаллах*, Письма в ЖЭТФ, **93**, 245-251 (2011).

11. С.А. Ромашевский, В.А. Хохлов, С.И. Ашитков, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, П.С. Комаров, А.Н. Паршиков, Ю.В. Петров, Е.В. Струлева, П.А. Цыганков, *Фемтосекундное лазерное воздействие на многослойную наноструктуру металл-металл*, Письма в ЖЭТФ, **113**, 311-319 (2021).

12. Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, *Динамика абляции золота в воду*, ЖЭТФ, **154**, 92-123 (2018).

13. Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.A. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, *Hydrodynamic phenomena induced by laser ablation of metal into liquid*, Appl. Surf. Sci, **492**, 285-297 (2019).

14. Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, V.A. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, *Condensation of laser-produced gold plasma during expansion and cooling in a water environment*, Contrib. Plasma Phys, **59**(6), e201800180 (2019).

15. N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, Yu.V. Petrov, V.A. Zhakhovsky. *Hydrodynamic and molecular-dynamics modeling of laser ablation in liquid: from surface melting till bubble formation*, Optical and Quantum Electronics, **52**, 63 (2020).

16. Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, *Физические процессы при лазерной абляции в жидкость*, Письма в ЖЭТФ, **115**, 20-27 (2022).

19 статей опубликовано в индексируемых Web of Science: Core Collection

рецензируемых журналах по материалам конференций.

Большинство публикаций написано с соавторами по схеме: эксперимент, как правило проведенный сотрудниками ОИВТ РАН (С.И. Ашитков и др., А.Я. Фаенов и др.) - теоретический анализ на основе 2Т-ГД расчетов, при необходимости дополненных МД-моделированием, выполненным, как правило, В.В. Жаховским и др. В.А. Хохлов выполнил 2Т-ГД расчеты и принимал активное участие в обсуждении постановки задач и теоретическом анализе полученных результатов. Публикации, в которых основные обсуждаемые результаты относятся к эксперименту и/или МД-моделированию, а 2Т-ГД расчет играет только вспомогательную роль для запуска МД в список основных не включены.

Диссертационный совет подтверждает, что все основные положения и выводы диссертации содержатся в опубликованных по теме диссертации работах. Автореферат передает содержание диссертации с достаточной полнотой.

На диссертацию и автореферат поступили только положительные отзывы. В них отмечается актуальность работы, важность полученных научных результатов и их новизна. В отзывах оппонентов и ведущей организации отмечаются следующие критические замечания:

1. Предположение (1.1) о том, что свободная энергия двухтемпературной системы разбивается на сумму слагаемых, каждое из которых зависит только от одной температуры, вообще говоря, нуждается в теоретическом обосновании. Так, в кристаллах в рамках квазигармонического приближения это можно сделать на основе приближения Борна-Оппенгеймера, при этом ионный вклад будет зависеть от электронной температуры.
2. Начальная часть взаимодействия УКЛИ с металлами рассмотрена в 2Т-ГД модели без учета конкретного влияния неравновесной и термализованной динамики электронов на их оптические свойства, а также процессов электронной и электронно-ионной эмиссии, фото- и ударного

возбуждения наряду с оже-рекомбинацией d-электронов в металлах. Хотя в предложенной 2Т-ГД модели используется относительная шкала поглощенной плотности энергии УКЛИ, в значительной степени учитывающая динамические изменения оптических свойств, и гидродинамические процессы реализуются на больших временах по сравнению с длительностью УКЛИ, представляется актуальной оценка влияния оптических и эмиссионных эффектов, а также межзонной динамики носителей на 2Т-стадию рассматриваемых явлений.

3. Почему в качестве критерия двухтемпературности используется время импульса, а не мощность энерговыделения? Ведь разница температур электронной и ионной подсистем возникает из-за ограниченной мощности теплообмена между подсистемами.
4. На стр. 22 присутствует неверное утверждение по поводу использования матрицы плотности в методе функционала плотности. В реальности в методе функционала плотности ключевой величиной является электронная плотность.
5. В диссертации упоминаются метастабильные состояния, но их роль подробно не обсуждается. В частности, в списке литературы отсутствует одна из наиболее цитируемых работ на эту тему [Povarnitsyn M.E. Phys. Rev. B **75**, 235414 (2007)].
6. При рассмотрении критерия разрушения в разделе 1.4 считается, что образование единичной полости сразу приводит к разрушению. В то же время, из МД расчетов и эксперимента известно, что при динамическом растяжении образуется множество очагов разрушения, и их концентрация растет со скоростью деформации, что особенно актуально для рассматриваемых субпикосекундных импульсов облучения. Причиной является конечная скорость роста полостей, которая обеспечивает релаксацию растянутого вещества только при наличии достаточно большой концентрации полостей. Это обстоятельство совершенно не учитывается в используемом критерии разрушения.

7. Практически во всей диссертации используется формула (1.46) для поглощения лазерного излучения, в которой считается известным коэффициент отражения и глубина поглощения. Однако для длинных импульсов, рассматриваемых в главе 5, эти предположения могут нарушаться, и необходимо решать уравнение Гельмгольца для напряженности электрического и магнитного поля на заданном профиле комплексной диэлектрической проницаемости.
8. При воздействии на диэлектрики (глава 2) формула (1.46) также может нарушаться в силу того, что процесс поглощения становится неоднородным из-за большой глубины поглощения. Обоснование использования одномерного приближения для поглощения рентгеновского излучения в главе 2 отсутствует.
9. При анализе взаимодействия УКЛИ с диэлектриками представляется целесообразным рассматривать не только электроны, а электрон-дырочную плазму в целом, ее амбиполярную диффузию, дополнительную сверхбыструю плазменную генерацию нетепловых напряжений (посредством акустического потенциала деформации; актуально также для фотовозбуждения УКЛИ d-электронов в металлах).
10. При (суб)наносекундной лазерной абляции в жидкостях возможны режимы оптического пробоя жидкости и/или абляционного факела, которые стоит дифференцировать от режимов, рассматриваемых в работе.
11. В тексте следовало бы более подробно остановиться на экспериментальных данных, с которыми проводилось сравнение, чтобы можно было судить о степени соответствия расчетов и экспериментов, например по порогам абляции в главе 4. Чаще всего просто указано, что соответствие есть, но без конкретных чисел. Недостаточно внимания уделено численной схеме решения уравнений теплопроводности и гидродинамики и ее тестированию. Проводилось ли решение тестовых задач? Проводилось ли сравнение с однотемпературным приближением? Полученные результаты представляются физически правильными, но

тестирование численной схемы и модели было бы не лишним. При симметричном гауссовом профиле пучка по времени, с какого отрицательного момента времени начинались расчеты? В тексте не обсуждается, почему можно пренебречь потерями на тепловое излучение со свободной поверхности? На рис. 2.6 и 2.7 наблюдаются осцилляции за фронтом ударной волны - является ли это численным эффектом?

12. В работе присутствуют стилистические и орфографические ошибки, опечатки и неаккуратности в оформлении.

В отзывах указано, что перечисленные вопросы и замечания носят уточняющий характер, не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы Хохлова В.А. и не влияют на общую высокую оценку диссертации как законченной и актуальной научно-квалификационной работы, имеющей научную новизну и практическую значимость.

На все поступившие вопросы и замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в области изучения воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени, а ведущая организация – признанным научным центром в данной области.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность выполненных соискателем исследований В.А. Хохлова является квалифицированной и самостоятельной научной работой и удовлетворяет всем требованиям обоснованности, новизны и значимости, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

В диссертации построена гидродинамическая теория и исследованы течения в веществе в особом неравновесном двухтемпературном (2Т) состоянии, когда температура электронной подсистемы заметно превышает фононную температуру атомной подсистемы. Несмотря на краткость существования таких

состояний, их эволюция после воздействия ультракороткого лазерного импульса определяет всю последующую динамику и фазовые превращения вещества.

Таким образом, тематика диссертации соответствует пункту 5 паспорта специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Научное значение диссертации состоит в следующем.

1. Разработанная теория позволила впервые корректно описать 2Т-эффекты в конденсированном веществе мишеней. В частности, проанализировано принципиальное отличие гомогенного плавления в широкой области по мере постепенного подтягивания ионной температуры к электронной от движения фронта плавления (задачи Стефана) в однотемпературном случае.
2. Молекулярно-динамическое (МД) моделирование, стартующее с состояния, полученного в 2Т-ГД расчете, или 2Т-ГД расчет с использованием впервые предложенного варианта критерия разрыва, дает правильное описание процесса откольной абляции. Получаемые порог абляции, момент отрыва, толщина отрывающегося слоя и его скорость точно соответствуют экспериментальным результатам.

При учете радиального распределения интенсивности лазерного излучения – падения интенсивности излучения от центра к периферии лазерного пятна – отлетающий слой имеет вид полупрозрачного купола, опирающегося на практически плоское основание, что соответствует схеме в опытах Ньютона (с перевернутой линзой). Это позволило корректно объяснить наблюдающиеся при лазерной абляции «кольца Ньютона» в микрофотографиях отраженного зондирующего импульса.

3. Разработанная модель с включением сдвиговой упругости позволяет (впервые) получить результаты, полностью соответствующие МД-моделированию и экспериментам.

В том числе показано, что вещество в короткой треугольной ударной волне (УВ) остается упругим (скорость УВ соответствует упругому веществу) несмотря на значительное превышение классического порога упругости.

4. Разработанное расширение модели и расчетной схемы позволило впервые описать воздействие ультракоротких лазерных импульсов на мишени, состоящие из двух (пленка на подложке) и более (наноламинаты) слоев веществ с существенно различными свойствами. Прослежен переход от колебаний пленки на подложке к отслоению пленки и к разрыву в пленке. Полученные результаты хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Впервые теоретически исследовано поведение наноламината из чередующихся тонких слоев никеля и алюминия. Показано, что существует порог разрыва в первом слое никеля, а следующий порог соответствует разрыву в первом слое алюминия вблизи границы с первым слоем никеля. Полученные пороги соответствуют наблюдаемым в эксперименте порогам разрыва в слое никеля и вблизи границы первых слоев никеля и алюминия.

5. Проведено исследование лазерной абляции в жидкость (на примере абляции золота в воду) в широком диапазоне длительностей лазерных импульсов от фемто- до наносекундного диапазона. Впервые корректно объяснено образование наночастиц золота в воде в результате развития неустойчивости Рэлея–Тейлора на границе воды и оторвавшегося слоя золота, возникающей вследствие торможения контакта водой (в случае коротких лазерных импульсов) и при конденсации золота, продиффундировавшего в воду при контакте сверхкритических воды и золота (при длинных импульсах).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики состоит в том, что построенная в работе модель 2Т-гидродинамики необходима для корректного описания процессов в веществе мишеней при воздействии ультракоротких лазерных импульсов.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации условий при различных применениях лазерных технологий, в частности лазерной обработке материалов, включая лазерную абляцию и лазерное упрочнение

поверхности, получением взвеси наночастиц металла в жидкости (золота в воде) при лазерной абляции в жидкость.

Достоверность полученных результатов обеспечивается надёжностью применявшихся методов, согласием с результатами, полученными в других работах, и согласием с данными физических и численных (МД) экспериментов, выполненных соавторами публикаций и другими авторами.

Личный вклад соискателя состоит в разработке теоретической модели и расчетной схемы 2Т-гидродинамики и проведении 2Т-гидродинамического моделирования.

Во всех совместных публикациях соискателем проведено моделирование начальной 2Т-стадии, по результатам которого, при необходимости, проводилось МД-моделирование. Соискатель принимал активное участие на всех этапах обсуждения постановки задачи и анализа полученных результатов.

Полученные в диссертации результаты и развитые в ней методы рекомендуется использовать в Объединенном институте высоких температур РАН, Физико-техническом институте РАН, Физическом институте им. Лебедева РАН, Институте электрофизики и электроэнергетики РАН, Институте физики твердого тела РАН, Челябинском государственном университете, Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии РАН и ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Росатом.

В ходе защиты диссертации были заданы вопросы, на которые В.А. Хохлов дал исчерпывающие ответы и высказан ряд пожеланий для дальнейшей работы. Критических замечаний высказано не было.

На заседании 28.03.2025 диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение создающее новое направление в

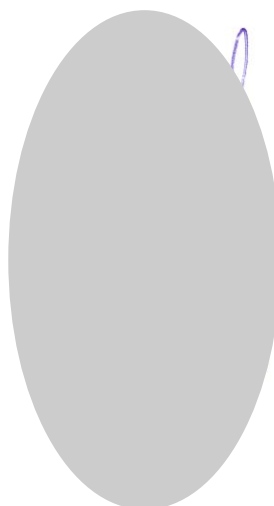
теоретическом описании воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени, а также имеющих важное прикладное значение, присудить Хохлову В.А. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 13 докторов наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту _0_ человек, проголосовали: за - 13 , против - 0 .

Председатель

диссертационного совета № 24.1.128.01

член-корр. РАН



В.В. Лебедев

Ученый секретарь

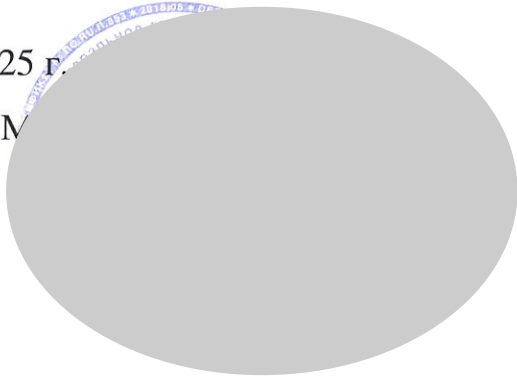
диссертационного совета № 24.1.128.01

доктор физ.-мат. наук

В.Э. Адлер

28 марта 2025 г.

М

A large grey oval redaction covering a signature in blue ink.