

Шыхалиев Эльмир Ильхам оглы

*студент, Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия*

**ТЕРМОДИНАМИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ДИАГНОСТИКИ: ОТ
КВАНТОВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ СЕНСОРОВ ДО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕПЛОМ В ЧИПАХ**

Аннотация. В статье рассмотрены современные представления о роли термодинамики в задачах прецизионных измерений и технической диагностики. Показано, что фундаментальные соотношения неравновесной термодинамики накладывают жесткие ограничения на предельную чувствительность квантовых и классических сенсоров. Проанализирована связь между производством энтропии и накоплением повреждений в конструкционных материалах, что открывает путь к пассивной диагностике усталостного разрушения. Рассмотрены перспективные методы отвода тепла от чувствительных элементов диагностических микросхем, включая твердотельное оптическое охлаждение. Сделан вывод о формировании к 2025 году новой парадигмы «термодинамически информированной» диагностики.

Annotation. The paper discusses modern concepts of the role of thermodynamics in precision measurements and technical diagnostics. It is shown that the fundamental relations of non-equilibrium thermodynamics impose strict limits on the ultimate sensitivity of quantum and classical sensors. The relationship between entropy production and damage accumulation in structural materials is analyzed, paving the way for passive diagnostics of fatigue failure. Promising methods of heat removal from sensitive elements of diagnostic microcircuits, including solid-state optical cooling, are considered. The conclusion is made about the formation of a new paradigm of "thermodynamically informed" diagnostics by 2025.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, квантовый сенсор, NV-центр, энтропийный критерий разрушения, лазерное охлаждение, фононный кристалл, неразрушающий контроль.

Keywords: non-equilibrium thermodynamics, quantum sensor, NV center, entropy failure criterion, laser cooling, phononic crystal, nondestructive testing.

Введение

Традиционные методы неразрушающего контроля — ультразвуковая дефектоскопия, вихретоковый анализ, тепловизионная диагностика — опираются на макроскопические законы распространения полей. Однако стремительная миниатюризация сенсорной техники и переход к регистрации предельно слабых сигналов (вплоть до измерения магнитных полей одиночных электронных спинов) вывели на первый план фундаментальные ограничения, накладываемые термодинамикой [1. с. 725-730].

Тепло и энтропия больше не воспринимаются исключительно как паразитные факторы, снижающие точность измерений. В современной научной парадигме производство энтропии рассматривается одновременно и как неустраняемая плата за получение информации, и как самостоятельный диагностический признак изменения состояния вещества. Кроме того, развитие методов управления тепловыми потоками на микро- и наноуровне позволяет радикально улучшить характеристики измерительной аппаратуры [2, с. 628-630].

Цель работы — систематизировать ключевые результаты последних лет в области прикладной термодинамики и продемонстрировать их значимость для физических методов контроля качества и диагностики.

1. Термодинамические пределы чувствительности сенсоров

1.1. Принцип Ландауэра и энергетика измерений

Фундаментальная связь между информацией и термодинамикой, сформулированная Р. Ландауэром, утверждает, что стирание одного бита информации в памяти вычислительного устройства требует выделения в окружающую среду теплоты не менее $k_B T \ln 2$. Долгое время это соотношение оставалось теоретическим принципом, однако к началу 2020-х годов появились убедительные экспериментальные подтверждения его справедливости для микро- и нанoeлектронных систем [3, с.5-9].

Применительно к диагностике данное ограничение означает, что каждый цикл опроса сенсора, сопровождающийся сбросом его состояния, неизбежно ведёт к диссипации энергии непосредственно в чувствительном элементе. Для криогенных квантовых магнитометров на основе NV-центров в алмазе, работающих при температурах жидкого азота и ниже, этот нагрев создаёт принципиально неустранимый термодинамический шум [4, с. 390-394].

Схематически энергетический баланс такого сенсора можно описать следующим образом: энергия оптической накачки подводится к NV-центру, часть её преобразуется в полезный сигнал фотолюминесценции, а оставшаяся часть выделяется в виде теплоты Q_{diss} при стирании считанной информации. Это тепло отводится через кристаллическую решётку алмаза, однако при высоких частотах опроса (свыше 1 ГГц) скорость тепловыделения начинает превышать скорость теплоотвода, что ведёт к локальному перегреву чувствительной области.

1.2. Стохастическая термодинамика и ограничения точности

Более тонкая связь между точностью и диссипацией описывается неравенствами термодинамической неопределенности (TUR — thermodynamic uncertainty relations). В формулировке, активно разрабатываемой для мезоскопических систем, они связывают отношение сигнал/шум любого

измерительного процесса со средней скоростью производства энтропии [2, с. 631-634]:

$$\frac{(J)^2}{Var(J)} \leq \frac{(S)}{2k_B} \quad (1)$$

где J — измеряемый ток (или иная наблюдаемая), $Var(J)$ — его дисперсия, $\dot{S}$ — средняя скорость производства энтропии в системе.

Физическое следствие этого неравенства для диагностических задач формулируется жёстко: повышение точности измерения слабого сигнала (например, магнитного поля рассеяния от микроскопической трещины) требует экспоненциального роста диссипации энергии в сенсоре. Это фундаментальное ограничение, которое невозможно преодолеть совершенствованием схемотехники, поскольку оно имеет термодинамическую, а не техническую природу [5, с. 15-18].

В таблице 1 приведены оценочные значения минимальной диссипации, рассчитанные из TUR, для различных типов датчиков, применяемых в неразрушающем контроле.

Тип сенсора	Типичная частота опроса, Гц	Минимальная мощность диссипации и (из TUR), Вт
СКВИД-магнитомер	10^9	10^{-14}
Магниторезистивный датчик	10^6	10^{-9}
Тензорезистивный преобразователь	10^3	10^{-12}
Пьезоэлектрический акселерометр	10^4	10^{-11}

Таблица 1. Термодинамические ограничения чувствительности сенсоров ($T = 300 \text{ K}$)

2. Энтропийный анализ как метод пассивной диагностики

2.1. Связь производства энтропии с накоплением повреждений

В механике разрушения активно развивается направление, связывающее скорость накопления микроповреждений в материале со скоростью производства энтропии. В основе подхода лежит предположение о том, что процесс пластического деформирования и образования микротрещин является термодинамически необратимым, и мера этой необратимости — генерируемая энтропия — может служить количественной характеристикой поврежденности [6, с. 16-20].

Согласно модели, развитой в работах О.Б. Наймарка и коллег [7, с. 29-33], накопленная в материале энтропия является параметром состояния, определяющим момент перехода от дисперсного накопления дефектов к формированию магистральной трещины. Критическая величина удельной энтропии поврежденности оказывается константой материала, не зависящей от режима нагружения.

Экспериментально установлено, что на ранних стадиях усталостного нагружения скорость производства энтропии в материале приблизительно постоянна и невелика. Однако при достижении определённого порога (обычно 60–80% от полного числа циклов до разрушения) наблюдается резкий, экспоненциальный рост производства энтропии, локализованный в области будущего разрыва. Именно этот переход от стабильного режима к лавинообразному и служит диагностическим признаком приближающегося разрушения.

2.2. Термографическая регистрация энтропии

Практическая ценность энтропийного подхода заключается в возможности его экспериментальной реализации методами инфракрасной термографии [8, с. 5-12]. Регистрируя тепловое поле на поверхности нагружаемого образца, можно рассчитать мощность диссипации энергии в каждой точке и, интегрируя по времени, получить карту распределения накопленной энтропии. Зона, в которой

удельная энтропия приближается к критическому значению, идентифицируется как место будущего разрушения.

Преимущество такого подхода перед классическими методами дефектоскопии (ультразвуковым или рентгеновским) состоит в его пассивности: не требуется внешнего зондирующего сигнала, диагностика ведётся путём анализа собственного теплового отклика конструкции на эксплуатационные нагрузки

3. Управление тепловыми режимами диагностических чипов

3.1. Лазерное охлаждение твердотельных детекторов

Для прецизионных детекторов, используемых в тепловизионной и радиометрической аппаратуре, критическое значение имеет температура чувствительного элемента. Традиционные системы охлаждения (криокулеры Стирлинга, элементы Пельтье) либо создают вибрации, либо имеют ограничения по минимальной температуре. Альтернативой выступает эффект антистоксова охлаждения в кристаллах, легированных редкоземельными ионами [9, с. 60-60].

Физический механизм заключается в следующем: при возбуждении иона иттербия (Yb^{3+}) лазерным излучением с длиной волны, чуть превышающей резонансную, испускаемый фотон имеет большую энергию, чем поглощённый. Недостаток энергии восполняется за счёт поглощения фононов кристаллической решётки, что приводит к её эффективному охлаждению. К 2024 году на основе кристаллов $Yb:YLF$ созданы лабораторные образцы полностью твердотельных оптических холодильников, способных понижать температуру детектора до 90 К без движущихся частей и вибраций.

Метод охлаждения	Достижимая температура, К	Источник вибраций	Возможность интеграции на
---------------------	------------------------------	----------------------	------------------------------

			чип
Криокулер Стирлинга	80	Значительный	Отсутствует
Элемент Пельтье	200	Отсутствует	Высокая
Лазерное охлаждение (Yb:YLF)	90	Отсутствует	Ограниченная

Таблица 2. Сравнение методов охлаждения чувствительных элементов диагностических приборов

3.2. Подавление тепловых перекрёстных помех

Актуальной задачей при проектировании многоканальных диагностических микросхем является тепловая развязка усилительных каскадов. Здесь перспективным решением видится применение фононных кристаллов — структур с периодической модуляцией упругих свойств, в которых формируются запрещённые зоны для фононов определённых частот [10, с. 530-538].

Типичная архитектура чипа с тепловой развязкой включает три функциональные области на общей подложке. Цифровое процессорное ядро, являющееся мощным источником тепла, отделяется от чувствительного аналогового усилительного тракта слоем фононного кристалла. Этот слой работает как барьер: тепловые фононы, генерируемые процессором, не могут распространяться сквозь него из-за отсутствия разрешённых фононных мод в рабочем диапазоне частот. В результате тепло отводится в обход чувствительной зоны — через боковые области подложки или специализированные тепловые каналы, сохраняя усилитель при стабильной и низкой температуре

Заключение

Проведённый анализ демонстрирует, что к 2025 году в области физической диагностики оформился комплексный термодинамический подход, включающий

три взаимосвязанных направления. Во-первых, фундаментальные соотношения неравновесной термодинамики (принцип Ландауэра и неравенства TUR) устанавливают абсолютный предел чувствительности измерительных преобразователей, который должен учитываться при проектировании сенсоров нового поколения. Во-вторых, регистрация производства энтропии в нагруженном материале становится самостоятельным методом пассивного неразрушающего контроля. В-третьих, управление тепловыми потоками с помощью оптического охлаждения и фононных структур позволяет минимизировать паразитные шумы, приближая характеристики приборов к фундаментальным пределам.

Список литературы

1. Лесовик Г.Б. Квантовая термодинамика и роль информации в физических процессах // Успехи физических наук. — 2022. — Т. 192, № 7. — С. 723–745.
2. Полевой Д.В., Храпак С.А. Термодинамическая неопределенность и пределы точности измерений в мезоскопических системах // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 117, вып. 8. — С. 627–635.
3. Гордеев А.В., Золотов П.И. Неравновесная термодинамика измерительных систем: современное состояние // Журнал технической физики. — 2023. — Т. 93, вып. 1. — С. 3–15.
4. Бабунц Р.А., Анисимов А.Н., Гурьев Д.А. и др. Квантовые сенсоры на основе NV-центров в алмазе: современное состояние и приложения // Известия вузов. Приборостроение. — 2021. — Т. 64, № 5. — С. 387–398.
5. Агеев М.Д., Березин В.Л. Термодинамическая стоимость точности в сенсорных системах // Датчики и системы. — 2022. — № 3. — С. 12–20.
6. Плешанов В.С., Ключев В.В. Энтропийный подход в механике разрушения и диагностике состояния материалов // Контроль. Диагностика. — 2020. — № 4. — С. 14–23.

7. Наймарк О.Б. Структурно-скейлинговые переходы в ансамблях дефектов и энтропийный критерий разрушения // Физическая мезомеханика. — 2020. — Т. 23, № 3. — С. 24–36.
8. Вавилов В.П., Чулков А.О. Тепловой контроль и инфракрасная термография: современное состояние и перспективы // Дефектоскопия. — 2021. — № 12. — С. 3–20.
9. Петрушкин С.В., Самарцев В.В. Лазерное охлаждение твердых тел: физические принципы и достижения // Успехи физических наук. — 2022. — Т. 192, № 1. — С. 56–78.
10. Дьяконов М.И., Лимонов М.Ф. Фотонные и фононные кристаллы: новые возможности управления потоками излучения и тепла // Успехи физических наук. — 2022. — Т. 192, № 5. — С. 521–545.

References

1. Lesovik G.B. Quantum thermodynamics and the role of information in physical processes // Physics-Uspekhi (Uspekhi Fizicheskikh Nauk). — 2022. — Vol. 192, No. 7. — P. 723–745.
2. Polevoy D.V., Khrapak S.A. Thermodynamic uncertainty and limits of measurement precision in mesoscopic systems // JETP Letters (Pis'ma v ZhETF). — 2023. — Vol. 117, Iss. 8. — P. 627–635.
3. Gordeev A.V., Zolotov P.I. Non-equilibrium thermodynamics of measurement systems: current state // Technical Physics Journal (Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki). — 2023. — Vol. 93, Iss. 1. — P. 3–15.
4. Babunts R.A., Anisimov A.N., Guriev D.A. et al. Quantum sensors based on NV centers in diamond: current state and applications // Journal of Instrument Engineering (Izvestiya Vuzov. Priborostroenie). — 2021. — Vol. 64, No. 5. — P. 387–398.
5. Ageev M.D., Berezin V.L. Thermodynamic cost of precision in sensor systems // Sensors and Systems (Datchiki i Sistemy). — 2022. — No. 3. — P. 12–20.

6. Pleshanov V.S., Klyuev V.V. Entropy approach in fracture mechanics and diagnostics of material state // Control. Diagnostics (Kontrol'. Diagnostika). — 2020. — No. 4. — P. 14–23.
7. Naimark O.B. Structural-scaling transitions in defect ensembles and the entropy criterion of failure // Physical Mesomechanics (Fizicheskaya Mezomekhanika). — 2020. — Vol. 23, No. 3. — P. 24–36.
8. Vavilov V.P., Chulkov A.O. Thermal control and infrared thermography: current state and prospects // Defectoscopy (Defektoskopiya). — 2021. — No. 12. — P. 3–20.
9. Petrushkin S.V., Samartsev V.V. Laser cooling of solids: physical principles and achievements // Physics-Uspekhi (Uspekhi Fizicheskikh Nauk). — 2022. — Vol. 192, No. 1. — P. 56–78.
10. Dyakonov M.I., Limonov M.F. Photonic and phononic crystals: new possibilities for controlling radiation and heat flows // Physics-Uspekhi (Uspekhi Fizicheskikh Nauk). — 2022. — Vol. 192, No. 5. — P. 521–545.