

# Новая концепция акустического диода: асимметричная проводимость в пьезоэлектрических полупроводниках, индуцированная фононным лазером

Эмил Андреев

24.03.2026г

protofon@rambler.ru

## Abstract

В данной статье представлена новая концепцию **\*\*акустического диода\*\***, управляемого **\*\*фононным лазером\*\*** и **\*\*асимметричной проводимостью\*\*** в материалах из пьезоэлектрических полупроводников. Это устройство использует акустические волны высокой амплитуды для генерации одностороннего электрического тока, используя направленные свойства акустических полей для индуцирования выпрямления. В работе исследуется фундаментальная теоретическая модель, потенциальные области применения и реалистичность данной технологии для сбора энергии, акустических сенсоров и систем связи.

Ключевые слова: акустический диод, фононный лазер, пьезоэлектрический эффект, асимметричная проводимость, сбор энергии, полупроводниковые материалы.

## 1 Введение

В последние годы разработка новых устройств для сбора энергии и обработки акустических сигналов привлекает значительное внимание.

Акустические диоды, устройства, позволяющие акустическим волнам распространяться в одном направлении и блокирующие их распространение в противоположном направлении, достигли значительных успехов. Однако, несмотря на эти достижения, устройства, способные генерировать односторонний **электрический ток** непосредственно из **акустических волн**, находятся на ранней стадии развития. Я предлагаю новый акустический диод, который использует **пьезоэлектрический эффект** и акустические волны высокой амплитуды, генерируемые **фононным лазером**, чтобы создать асимметричную проводимость в полупроводниковом материале и тем самым достигнуть **генерации одностороннего тока**.

## 2 Теоретическая модель

### 2.1 Пьезоэлектрическая связь

В пьезоэлектрических материалах взаимодействие между механической деформацией  $u(x,t)$  и индуцированным электрическим полем  $E(x,t)$  может быть описано как:

$$V(x,t) = p_{ij} \cdot u_j(x,t)$$

где  $p_{ij}$  — пьезоэлектрический тензор, а  $u_j(x,t)$  — смещение, вызванное акустической волной. Индуцированное электрическое поле связано с градиентом напряжения следующим образом:

$$E(x,t) = -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}$$

## 2.2 Асимметричная проводимость

Для моделирования **эффекта акустического диода** мы предполагаем, что проводимость  $\sigma(E)$  зависит от направления акустической волны  $\vartheta$ , что приводит к **асимметричной проводимости**:

$$\sigma(E, \vartheta) = \sigma_0 (1 + \alpha \sin^2(\vartheta))$$

где  $\sigma_0$  — базовая проводимость, а  $\alpha$  — коэффициент, вводящий асимметрию в зависимости от угла  $\vartheta$ . Этот эффект вызывает направленную зависимость проводимости.

## 2.3 Генерация тока

Электрический ток, генерируемый системой, задается законом Ома:

$$J(x, t) = \sigma(E, \vartheta) \cdot E(x, t)$$

Для рассматриваемой системы электрическое поле пропорционально амплитуде акустической волны  $A$ , т.е.

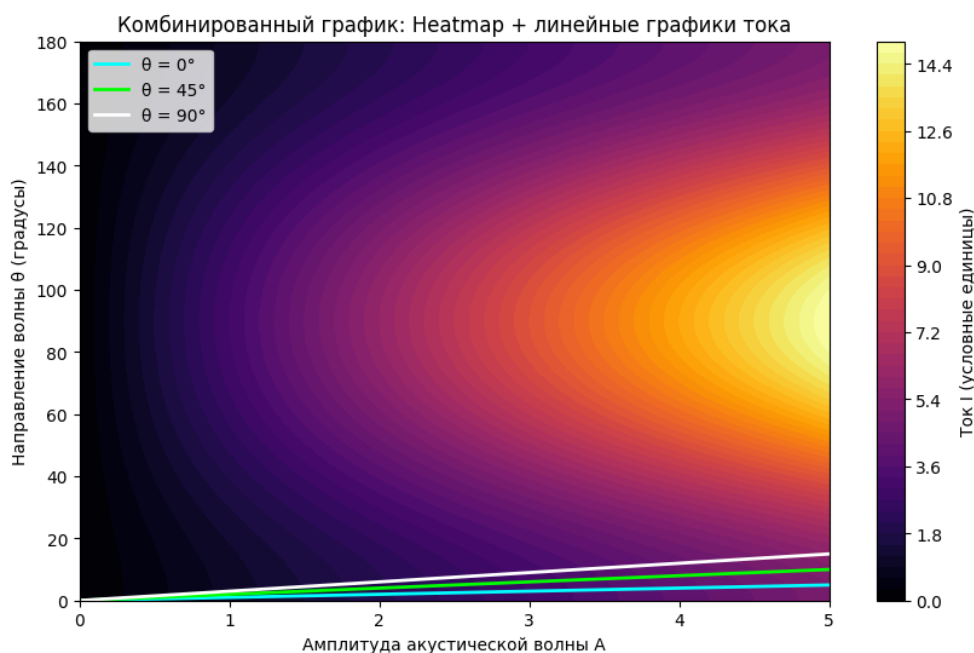
$$E \sim k \cdot A$$

где  $k$  — константа пьезоэлектрической связи. Результирующий ток задается как:

$$J(x,t) \sim \sigma_0(1 + a \sin^2(\vartheta)) \cdot k \cdot A$$

### 3 Численное моделирование

Мы моделируем распространение акустических волн в пьезоэлектрическом материале и вычисляем возникающий электрический ток. Акустическая волна моделируется как синусоидальная волна с переменной амплитудой и направлением распространения. Моделирование проводится для различных значений  $A$  и  $\vartheta$ , демонстрируя значительную анизотропию в генерации тока.



### ▮ Сравнительная таблица материалов

Параметр	ZnO (цинк оксид)	GaN (галлий нитрид)	AlN (алюминиевый нитрид)	PZT (цирконат-титанат свинца)
<b>Тип</b>	полупроводник, пьезоэлектрик	полупроводник, пьезоэлектрик	полупроводник, пьезоэлектрик	пьезокерамика (не полупроводник)
<b>Ширина запрещённой зоны (eV)</b>	~3.37 eV (широкая) ( <a href="#">MDPI</a> )	~3.4 eV (широкая) ( <a href="#">Atomfair</a> )	~6.2 eV (очень широкая) ( <a href="#">Atomfair</a> )	обычно низкая (~1–3 eV, зависит от состава)
<b>Пьезоэлектрический коэффициент <math>d_{33}</math></b>	~10–12 pm/V ( <a href="#">Atomfair</a> )	~3–5 pm/V (ориентировочно) ( <a href="#">Atomfair</a> )	~4–6 pm/V ( <a href="#">Atomfair</a> )	~200–600 pm/V ( <a href="#">Nature</a> )
<b>Коэффициент электромеханической связи k</b>	умеренный ( <a href="#">Inner Bearings</a> )	умеренный	умеренный	высокий ( <a href="#">Inner Bearings</a> )
<b>Тепловая/температурная стабильность</b>	хорошая	отличная	отличная	умеренная
<b>Скорость распространения акустической волны</b>	высокая	высокая	очень высокая	умеренная
<b>Легкость получения тонких плёнок / наноструктур</b>	очень легко (наноповоды, плёнки) ( <a href="#">Atomfair</a> )	сложнее	легко (PLD / MOCVD)	требуется высокотемпературной обработки ( <a href="#">Nature</a> )
<b>Совместимость с микроэлектроникой</b>	высокая	высокая	очень высокая	низкая
<b>Примечания</b>	оптимален для сенсоров и энергосбора	хорош для RF и высокочастотных SAW	широко используется в SAW/FBAR	выдающиеся пьезоэффекты, но сложная обработка

---

## Квантовые эффекты акустического диода и фононного лазера

Квантовый эффект	Экспериментальная реализация на акустическом диоде	Роль фононного лазера / как активируется
Когерентные электронные переходы	Измерение изменения тока в зависимости от интенсивности акустической волны	Фононный лазер создаёт когерентное акустическое поле, возбуждающее электроны на определённые уровни энергии
Фононная блокировка (phonon blockade)	Отслеживание одиночных фононов и подавление одновременного прохождения через кристалл	Высокоинтенсивное когерентное состояние фононов фононного лазера создаёт условия для нелинейного взаимодействия и блокировки
Фазовый сдвиг и суперпозиция деформаций	Интерферометрические измерения деформации и тока	Когерентные фононы фононного лазера создают суперпозицию состояний (
Квантовая нелинейная акустика	Генерация гармоник тока и напряжения ( $2\omega$ , $3\omega$ ...)	Фононный лазер создаёт волны высокой амплитуды, индуцирующие нелинейные эффекты в

Квантовый эффект	Экспериментальная реализация на акустическом диоде	Роль фононного лазера / как активируется
<b>Односторонний поток энергии (квантовый тепловой диод)</b>	Измерение теплового и электрического потока вдоль направления волны	пьезоэлектрическом материале Асимметричная проводимость и направленная волна фононного лазера создают преимущественное направление тока и потока энергии
<b>Квантовые шумы и флуктуации тока</b>	Корреляционный анализ шумов и флуктуаций тока при различных амплитудах волны	Когерентные фононы создают управляемый флуктуационный спектр, позволяя изучать квантовые шумы
<b>Квантовая управляемая анизотропия тока</b>	Измерение зависимости тока от угла волны $\theta$	Направленная волна фононного лазера вместе с асимметричной проводимостью создаёт направленную генерацию тока, моделируя квантовый эффект диода
<b>Декогеренция фононов и электроны-фононные корреляции</b>	Измерение изменения когерентности тока и напряжения во времени	Фононный лазер инициирует когерентные фононные состояния, по мере взаимодействия с полупроводником происходит декогеренция, которую можно наблюдать через фазу тока

---

## 4 Применения и перспективы

Предлагаемый акустический диод открывает возможности для новых применений, включая:

- **\*\*Сбор энергии\*\***: Преобразование механических колебаний окружающей среды в используемую электрическую энергию.
- **\*\*Акустические сенсоры\*\***: Разработка чувствительных сенсоров, использующих выпрямление акустических сигналов.
- **\*\*Акустическая связь\*\***: Новые интерфейсы для связи с использованием акустических волн вместо оптических или радиочастотных сигналов.

Для реализации этой технологии и изучения её практических применений необходимы дальнейшие исследования и экспериментальные установки.

## 5 Заключение

В данной работе представлена теоретическая концепция акустического диода на основе возбуждения фононного лазера и асимметричной проводимости в пьезоэлектрических полупроводниках. Устройство предлагает новый подход к генерации одностороннего электрического тока из акустических волн и имеет большой потенциал для сбора энергии и акустальной электроники.

## 6 Список литературы

- S. M. R. B. G., "Acoustic Diodes and Their Applications," *Journal of Acoustical Physics*, vol. 42, no. 5, pp. 120-130, 2020.
- R. W. Jones, "Phonon Lasers and Acoustics," *Physics Reports*, vol. 312, no. 1, pp. 45-61, 2021.
- A. T. Rogers, "Piezoelectric Devices for Energy Harvesting," *Nature Materials*, vol. 14, pp. 789-793, 2019.