

Что представляют собой ультрафиолетовые светодиоды и на чём основан их принцип работы?

Полупроводниковые источники ультрафиолетового излучения — это светодиоды, в которых излучение возникает при рекомбинации электронов и дырок в материалах с широкой запрещённой зоной. Для генерации в УФ-области требуется энергия перехода выше **3 эВ**, поэтому применяются соединения **GaN**, **AlGaN** и **AlN**.

Эти материалы позволяют изменять диапазон излучения: при увеличении содержания алюминия ширина запрещённой зоны возрастает от **3,42 эВ** (GaN) до **6,2 эВ** (AlN). Чем выше энергия перехода, тем короче длина волны фотона, что делает возможным получение излучения от ближнего ультрафиолета до бактерицидной области.

В каком диапазоне длин волн работают современные УФ-светодиоды?

Современные устройства охватывают диапазон **250–280 нм**, где находится пик бактерицидного действия. Средняя мощность излучения таких диодов — **0,5–2 мВт**.

Эффективность зависит от длины волны: при **250–255 нм** КПД не превышает **0,01–0,015 %**, а при **280–290 нм** достигает **0,3–0,4 %**.

В импульсном режиме в области **395–410 нм** (длительность импульса до **100 мкс**, коэффициент заполнения **0,25**) возможна импульсная мощность до **0,5 Вт** и КПД до **15 %**.

Почему эффективность УФ-диодов ограничена и что мешает её росту?

Главное ограничение связано с физикой полупроводниковых структур. Для коротковолнового излучения необходимо высокое содержание алюминия, но при этом ухудшается согласование кристаллических решёток, увеличивается количество дефектов и снижается эффективность рекомбинации.

Для компенсации применяют **сверхрешётки** и **промежуточные слои**, которые уменьшают внутренние напряжения и утечки носителей заряда. Однако даже при оптимизации структуры КПД остаётся низким — от тысячных долей процента до десятых, а выходная мощность не превышает нескольких милливатт.

Каков срок службы и стабильность УФ-светодиодов?

Ресурс работы ограничен несколькими сотнями или тысячей часов. Со временем происходит деградация активной области: из-за локального перегрева мощность излучения уменьшается на **15–30 %**. Повышенная плотность тока, необходимая для увеличения яркости, ускоряет старение и рост дефектов в кристалле. Даже при стабильных условиях эксплуатации светодиоды постепенно теряют излучательную способность.

Можно ли повысить ресурс и КПД технологическими решениями?

Оптимизация структуры и согласование решёток позволяют уменьшить количество дефектов и увеличить эффективность рекомбинации. Использование многослойных систем и улучшение теплового отвода продлевают срок службы и повышают стабильность работы. Тем не менее даже в лучших образцах КПД УФ-светодиодов остаётся в диапазоне **0,001–0,4 %**, а выходная мощность — в пределах нескольких милливатт.

Какова реальная стоимость и производственные ограничения УФ-светодиодов?

Стоимость бактерицидных светодиодов остаётся высокой, что связано с технологической сложностью и низким выходом годных кристаллов. Производство таких устройств требует точного контроля состава и структуры слоёв, поэтому себестоимость значительно выше, чем у газоразрядных источников. При этом выходная мощность редко превышает несколько милливатт, а срок службы составляет от сотен до тысячи часов. Даже при малом энергопотреблении эффективность не превышает десятых долей процента, что ограничивает их массовое применение в системах ультрафиолетового обеззараживания.

Какие достоинства и недостатки имеют УФ-светодиоды?

Преимущества:

- компактность и малые размеры;

- возможность формирования матриц;
- узкий спектр излучения;
- простота управления и направленность света.

Недостатки:

- крайне низкий КПД в диапазоне 250–280 нм;
- ограниченная мощность (1–2 мВт);
- короткий срок службы (от сотен до 1000 ч);
- высокая себестоимость.

Почему ближний УФ работает эффективнее, чем бактерицидный диапазон?

В ближнем УФ и на границе с видимым диапазоном ограничения технологии менее выражены. В области **395–410 нм** удаётся достичь **импульсного КПД до 15 %** при мощности **до 0,5 Вт**. В коротковолновом диапазоне (250–290 нм) эффективность гораздо ниже — **0,01–0,015 %** при **250–255 нм** и **0,3–0,4 %** при **280–290 нм**. Это отражает влияние алюминиевого компонента и структурных дефектов, которые особенно сильно снижают выход света при коротких длинах волн.

Подходят ли УФ-светодиоды для систем обеззараживания?

На данном этапе — ограниченно. Низкая мощность, короткий срок службы и высокая стоимость делают их применение в системах обеззараживания воздуха и воды экономически неэффективным. Однако технология активно развивается: совершенствование кристаллов AlGaIn и улучшение теплового отвода постепенно повышают КПД и надёжность, что открывает перспективы дальнейшего внедрения.

Краткое резюме характеристик УФ-светодиодов

- Материалы: **GaN, AlGaIn, AlN** ($E_g = 3,42\text{--}6,2$ эВ).
- Рабочие длины волн: **250–280 нм**.
- Мощность: **0,5–2 мВт**.
- КПД: **0,01–0,015 %** (250–255 нм), **0,3–0,4 %** (280–290 нм), до **15 %** в импульсах **395–410 нм**.
- Ресурс: **несколько сотен — до 1000 ч**, деградация **15–30 %**.
- Стоимость: высокая, из-за сложности технологии и низкого выхода годных элементов.



Производство
УФ ламп
УФ оборудования

УФ-светодиоды остаются компактными и перспективными источниками, но пока не способны заменить газоразрядные лампы в промышленных установках обеззараживания.