

# ФОТОДИОД

## Введение

Фотодиоды — полупроводниковые приборы, действие которых основано на изменении сопротивления р-п перехода или разности потенциалов на переходе при освещении прибора излучением соответствующего диапазона, создающим дополнительные носители заряда в области р-п перехода.

Фотодиоды используются как с внешним источником питания так и без него. В первом случае при последовательном соединении фотодиода, нагрузочного сопротивления и источника питания, фотодиод работает в режиме фотосопротивления. Такой режим работы называется фотодиодным. Во втором случае, т.е. в схеме без внешнего источника питания, фотодиод работает в режиме преобразователя энергии излучения в электрическую энергию. Такой режим работы называется вентильным. В фотодиодном режиме фотодиоды широко применяются в релейных схемах, в вычислительной технике, оптоэлектронике. В вентильном режиме фотодиоды применяются, например, для обеспечения питания искусственных спутников Земли.

Целью данной работы является исследование и сравнительный анализ характеристик фотодиода на р-п-переходе, не имеющего участка лавинного пробоя, и лавинного фотодиода в фотодиодном режиме работы.

## Принцип действия

Принцип действия фотодиода непосредственно следует из рассмотрения воздействия фотоактивного излучения на р-п переход.

Темновая вольтамперная характеристика фотодиода описывается выражением:

$$I = \frac{I_s}{[\exp(qU/kT) - 1]}, \quad (1)$$

где  $U$  — падение напряжения на р-п переходе,  $I_s$  — ток насыщения,  $q$  — заряд электрона. Ток насыщения в свою очередь определяется используемым материалом:

$$I_s = q \left( \frac{L_p p_{n0}}{\tau_p} + \frac{L_n n_{p0}}{\tau_n} \right), \quad (2)$$

где  $p_{n0}$ ,  $n_{p0}$  — темновые концентрации неосновных носителей заряда в п- и р-областях соответственно;  $L_p$ ,  $L_n$  — диффузионная длина р- и п- носителей соответственно;  $\tau_p$ ,  $\tau_n$  — время жизни р- и п- носителей соответственно.

При освещении диода излучением, способным создавать дополнительные носители заряда, ток в фотодиодном режиме возрастает. Образующиеся на переходе неосновные носители заряда  $\Delta p_n$  и  $\Delta n_p$  втягиваются в переход и увеличивают  $\tau$ . При линейной рекомбинации изменение концентрации носителей будет определяться формулами :

$$\Delta n = R\tau_n, \Delta p = R\tau_p, \quad (3)$$

где  $R$  — интенсивность возбуждения.

Таким образом, приращение тока линейно связано с интенсивностью возбуждения.

Быстродействие фотодиодов определяется рекомбинацией дополнительных носителей заряда. Обычно толщина области, на которую падает излучение, больше или порядка  $1/\alpha$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения, и меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. В этом случае быстродействие определяется отношением толщины этой области к диффузионной длине и может быть значительно меньше времени жизни неравновесных носителей заряда.

Широкое развитие лазерной техники вызвало необходимость создания быстродействующих фотодетекторов, имеющих высокую чувствительность к свету с определенной длиной волны и обладающих внутренним усилением. Основной побудительной причиной к разработке быстродействующих лавинных фотодиодов (ЛФД) с достаточно высоким усилением явилось развитие волоконно-оптических средств связи с низкими потерями и большой шириной полосы, предназначенных для спектрального диапазона 1–1,6 мкм, в котором многие волоконно-оптические материалы обладают низкими потерями при передаче. Помимо волоконно-оптической связи ЛФД могут открыть новые возможности перед активными лазерными системами формирования изображения и дальнометрии в окне прозрачности атмосферы (1,5 мкм), пассивными приборами ночного видения, работающими в максимуме свечения неба (1,6 мкм) и лазерными системами спутниковой связи. Последние разработки ЛФД, сформированных на многослойных структурах на основе 2-, 3- и 4-х компонентных соединений, открывают возможность обеспечения максимума чувствительности на любой длине волны в диапазоне 0,4–1,8 мкм за счет соответствующего выбора сплавов элементов III-V групп и их стехиометрического состава [1]. Основными факторами для выбора того или иного полупроводника являются квантовая эффективность в заданном спектральном диапазоне, быстродействие и шумы.

В ЛФД свободные носители размножаются за счет ударной ионизации атомов в сильном электрическом поле обратного смещенного перехода р-п, р-і-п типа или гетероперехода. Для развития лавины необходимо выполнение двух условий:

- Толщина обедненной области р-п-перехода, в которой сосредоточено внутреннее электрическое поле, должна превышать длину свободного пробега неосновных носителей заряда;
- энергия, накапливаемая неосновными носителями заряда в области перехода, должна быть достаточной для возбуждения валентных электронов полупроводника, то есть превышать порог лавинной ионизации.

При выполнении этих условий создаются вторичные пары носителей, разделяемые полем перехода. Толщина ОПЗ и напряженность внутреннего электрического поля в ней при заданном смещении зависят от структуры диода и от удельного сопротивления полупроводника. Поэтому напряжение лавинного пробоя связано с удельным сопротивлением материала

$$U_{л.п.} = b\rho^k \text{ для Ge } b = 85, k = 0,65. \quad (4)$$

Лавинное усиление фототока, проходящего через освещенный р-п- переход, используется в ЛФД, работающих в предпробойном режиме. Зависимость коэффициента лавинного усиления  $M$  от напряжения на фотодиоде выражается приближенным соотношением Миллера:

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{U}{U_{л.п.}} \right)^n \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $n$  — коэффициент, зависящий от ионизационных способностей электронов и дырок, от длины волны принимаемого излучения, а также от материала и конструкции ЛФД. Для

кремниевых фотодиодов  $n = 3,4-4,0$ , если генерация носителей происходит в р-области и лавина образуется в результате ударной ионизации, производимой электронами;  $n = 1,2-2,0$ , если ударная ионизация производится дырками, генерируемыми в п-области.

Произведение коэффициента на ширину полосы ЛФД может достигать более 100 Гц, за счёт чего прибор обеспечивает детектирование излучения в микроволновом диапазоне частот модуляции. Квантовая эффективность и быстродействие ЛФД определяется так же, как и для обычных ФД, так как первое слагаемое в (4), как правило меньше второго, то есть инерционность ЛФД определяется не процессами умножения, а прохождением носителей через область относительно слабого поля к контакту:

$$\tau_{\text{ЛФД}} = M\tau_1 + \tau_{\text{др.}}, \quad (6)$$

где  $\tau_1$  — время пролета носителем области умножения,  $\tau_{\text{др.}}$  — время пролета носителей от области умножения до контакта.

Очень резкая зависимость  $M$  от приложенного напряжения существенно осложняет возможность практического использования ЛФД с высокими коэффициентами усиления из-за весьма жёстких требований к точности поддержания на диоде рабочего напряжения. Сильная зависимость  $U_{\text{л.п.}}$  от температуры приводит к проблеме термостабилизации. Все эти факторы ограничивают применение лавинных диодов в аппаратуре.

## Основные физические параметры и характеристики.

**Статическая интегральная токовая чувствительность** определяется отношением  $S = I_{\Psi}/\Psi$ , где  $\Psi$  — интенсивность освещения, то есть число фотонов, падающих в единицу времени на единичную площадь. Различают чувствительность к монохроматическому излучению и интегральную чувствительность в диапазоне длин волн  $\lambda_1-\lambda_2$ .

**Рабочее напряжение.** Для обычного фотодиода рабочая точка выбирается на участке насыщения обратной ветви вольт-амперной характеристики фотодиода, для лавинного фотодиода — в предпробойной области. Как уже отмечалось, рабочее напряжение должно поддерживаться с высокой точностью (до 0,2 %). Снижение требований к точности установления напряжению питания для ЛФД достигается использованием структуры п-р-і-р-типа. Однако делать і-область слишком протяжённой нельзя, так как это сильно увеличивает рабочие напряжения и снижает быстродействие. Введение і-области толщиной порядка 50 мкм обеспечивает тот же коэффициент умножения при стабилизации питания 10 %.

**Граничная частота.** — определяет быстродействие диода. Она соответствует максимальной частоте модуляции светового потока, на которой статическая фоточувствительность фотодиода  $S(0)$  уменьшается до уровня  $0,707S(0)$ .

**Обнаружительная способность фотоприемника** — это величина обратная пороговой мощности.

**Шум-фактор** — определяется как отношение среднеквадратичного значения усиления к квадрату его среднего значения:

$$F(M) = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle^2}.$$

Это отношение не равно единице для ЛФД, поскольку лавинный процесс является по природе статистическим процессом и электронно-дырочные пары, генерируемые в данной точке обедненной области, претерпевают неодинаковое умножение —

в результате чего возникают флуктуации коэффициента умножения.  $F(M)$  зависит от отношения коэффициентов ионизации  $\alpha_p/\alpha_n$  и низкочастотного коэффициента  $M$ . Если  $\alpha_p = \alpha_n$ , на каждый фотоноситель, возбуждённый падающим излучением, в области умножения приходится три носителя (первичный носитель и вторичные электрон и дырка). Поэтому флуктуации, изменяющей число носителей на один, соответствует существенное относительное изменение их числа и шум-фактор оказывается большим. Если же один из коэффициентов  $\alpha$  пренебрежимо мал (например,  $\alpha_p \approx 0$ ), то на каждый фотоноситель в области умножения приходится около  $M$  носителей. В этом случае флуктуация, соответствующая изменению этого числа на один носитель, вызовет лишь незначительное относительное возмущение. Таким образом, при существенно различных  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  значение шум-фактора будет мало. Если инжектируются только электроны, то

$$F = kM + (2 - 1/M)(1 - k), \quad (7)$$

где  $k = \alpha_p/\alpha_n$  во всей области лавинного умножения. Для случая инжекции дырок  $k$  в этом выражении заменяют на  $k' = \alpha_n/\alpha_p$ .

**Световая ( или люкс-амперная) характеристика** — это зависимость фототока от освещённости, которая для фотодиодов соответствует прямой пропорциональности.

**Спектральная характеристика** — зависимость фототока от длины волны падающего света. Определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны полупроводника, при малых длинах волн — большим показателем поглощения и увеличением влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда. Таким образом, коротковолновая граница фоточувствительности фотодиода зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума сильно зависит от спектральной зависимости коэффициента поглощения и практически не зависит от толщины базы.

## Схема установки

Полная схема измерительной установки, позволяющая исследовать параметры и характеристики фотодиода при различной освещённости в статическом и динамическом режимах, приведена на рис. 1. В первом случае на светодиодах подается постоянное напряжение, во втором - синусоидальное или импульсное. Для проведения измерений в соответствующем режиме имеется переключатель «пост.-перем».

Схема состоит из двух электрически изолированных частей: цепи питания фотодиодов и цепи питания светодиодов. При этом обе части содержат переключатель «ФД-ЛФД», позволяющий измерять параметры либо кремниевого фотодиода ФД-6К, либо германиевого лавинного фотодиода ЛФД-2. Необходимость использования двух одинаковых арсенидогаллиевых светодиодов ЗЛ-107(Б) ИК-диапазона (0,91–0,99 мкм) в качестве источника света продиктована необходимостью жесткого закрепления светодиодов напротив фотодиодов.

Диод D в светодиодной цепи защищает светодиоды в случае неправильной полярности подключения источника питания. Встроенный миллиамперметр позволяет измерять ток, протекающий через светодиод. Светодиодная цепь также содержит нагрузочное сопротивление  $R_1 = 100$  Ом и предусматривает возможность подключения источников постоянного или переменного токов, а также вольтметра для измерения переменного напряжения, пропорционального току в светодиодной цепи.

Цепь фотодиода содержит нагрузочное сопротивление  $R_2 = 1$  кОм и переменные резисторы  $R_3 = 470$  Ом и  $R_4 = 6,8$  кОм, позволяющие плавно изменять напряжение на фотодиоде в широких пределах. Фотодиодная цепь также предусматривает возможность подключения источника постоянного тока и измерительных приборов.

Ниже описана методика измерения ВАХ в статическом режиме.

## Порядок выполнения работы

Исследовать два типа фотодиодов: ФД-6К (кремниевый) и лавинный фотодиод ЛФД-2 (германиевый), имеющих максимум спектральной чувствительности в ближней ИК области спектра.

Для проведения исследований в статическом режиме переключатель «пост.- перем.» поставить в положение «пост.».

### 1. Исследование ВАХ ФД-6К. Порядок проведения измерений:

- (а) Переключатель «ФД-ЛФД» в положении «ФД-темновой».
- (б) Снять темновую ВАХ ФД. Для этого:
  - Ручку «ВАХ» влево до упора;
  - Подключить вольтметр к клеммам «= $V_{\text{ФД-ЛФД}}$ ».
  - Ручкой «ВАХ» увеличивать напряжение до 22 В с шагом 2 В.
- (в) Снять ВАХ ФД при разных уровнях освещённости. Для этого:
  - Уменьшить напряжение до минимума ручкой «ВАХ».
  - Переключатель «ФД-ЛФД» в положении «ФД-световой».
  - Используя градуировочную кривую мощности (рис. 2), излучаемой светодионом, от тока через него протекающего, задавать различную мощность излучения светодиода (1 мВт, 3 мВт, 5 мВт). Ток светодиода контролируется по встроенному миллиамперметру « $I_{\text{СД}}$ », подаваемое на светодиод напряжение изменяется ручками « $I_{\text{СД}}$ -грубо» и « $I_{\text{СД}}$ -плавно».
  - Снять ВАХ для каждого уровня освещённости.
- (г) Построить ВАХ темновую и при разных уровнях освещённости.

### 2. Исследовать работу ЛФД в статическом режиме (переключатель «ФД-ЛФД» в положении «ЛФД-темновой»).

- (а) Снять темновую ВАХ ЛФД. Для этого:
  - Ручку «ВАХ» влево до упора;
  - Ручкой «ВАХ» напряжение на ЛФД регулировать следующим образом: от 0 до начала резкого роста тока (около 9 В) ручками «грубо» и «плавно», фиксируя значения напряжения и тока через 1 В. Далее (до достижения  $U$ , при котором  $M = 10$  — не более !!!),  $U_{\text{ЛФД}}$  увеличивать до тех пор, пока значение тока не достигнет десятикратного значения тока при  $U_{\text{ЛФД}} = 8$  В, то есть значение первичного фототока берется при  $U = 8$  В) напряжение фиксируется через каждые 0,1 В с целью не превышения заданного значения коэффициента лавинного умножения  $M$ .
- (б) Снять ВАХ ЛФД при разных уровнях освещённости. Для этого:
  - Уменьшить напряжение до минимума ручкой «ВАХ».

- Переключатель «ФД-ЛФД» в положении «ЛФД-световой».
- Используя градуировочную кривую мощности (рис. 2), излучаемой светодиодом, от тока через него протекающего, задавать различную мощность излучения светодиода (1 мВт, 3 мВт, 5 мВт) ручкой « $I_{\text{СД-грубо}}$ » и « $I_{\text{СД-плавно}}$ ». Ток светодиода контролируется по встроенному миллиамперметру « $I_{\text{СД}}$ ».
- Снять ВАХ для каждого уровня освещённости.

(с) Построить ВАХ темновую и при разных уровнях освещённости.

3. По полученным экспериментальным данным рассчитать следующие зависимости и величины:

- Построить график зависимости тока через ФД и ЛФД от мощности падающего излучения при фиксированном  $U = U_{\text{раб.}}$ .
- Рассчитать интегральную фоточувствительность для ФД и ЛФД:

$$K = \left. \frac{\Delta I}{\Delta \Psi} \right|_{U=\text{const}} \quad (8)$$

- Для ЛФД рассчитать  $M$  в темноте и при разных уровнях освещённости для  $U = 22 \text{ В}$  по формуле  $M = I(22 \text{ В}/I(8 \text{ В}))$  и построить график зависимости коэффициента лавинного умножения от освещённости.
- Построить график зависимости  $M = f(U/U_{\text{лав.}})$  для неосвещённого ЛФД.

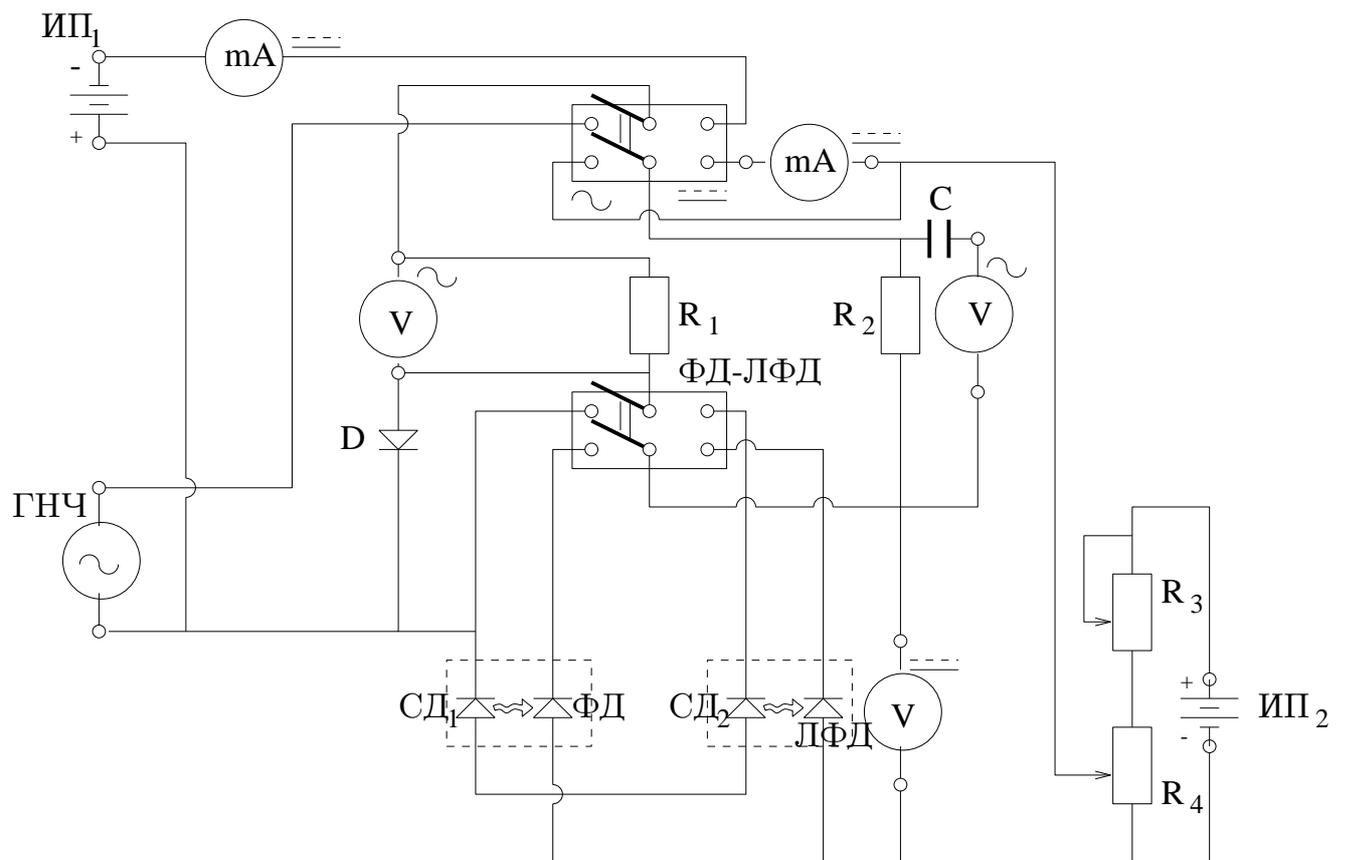


Рис. 1: Схема установки

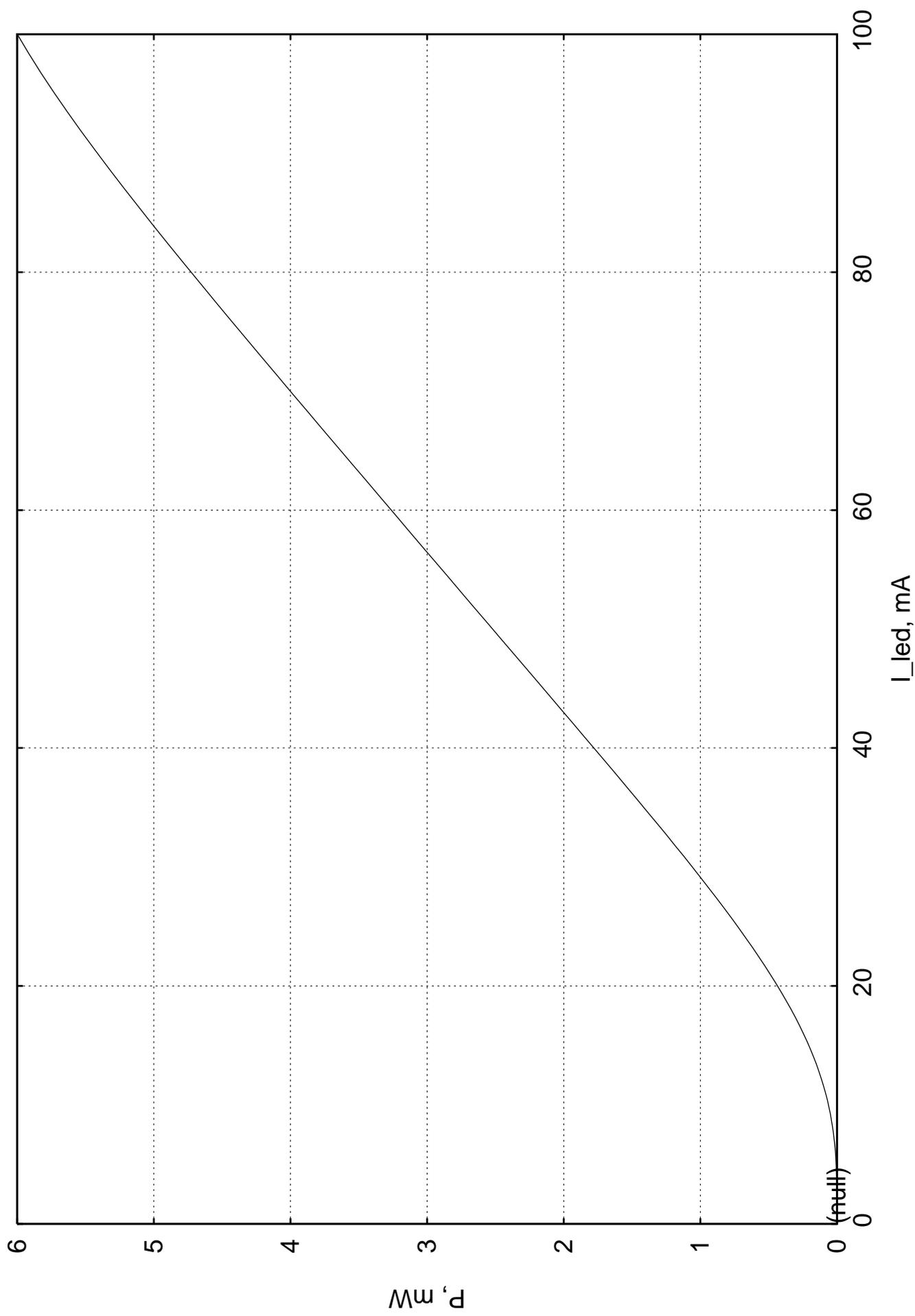


Рис. 2: Зависимость мощности излучения  $P_{\text{изл}}$  от тока через светодиод  $I_{\text{ст}}$ .

## Список литературы

- [1] Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. — Томск: Изд-во НТЛ, 2000. — 426 с.
- [2] Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990. — 262 с.
- [3] Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1987. — 479 с.
- [4] Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / под ред. Р. Дж. Киеса. — М.: Радио и связь. — 1985. — С. 289.
- [5] Электронные приборы / под ред. Г. Г. Шишкина. — М.: Энергоатомиздат. — 1989. — С. 289.
- [6] Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения: справочник. М.: Радио и связь. - 1987. — С. 68.
- [7] Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Т. 2, — М.: Мир. 1984. — С. 363.
- [8] Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / Под ред. В. И. Стафеева. — М.: Радио и связь. 1984. — С. 57–65, С. 130–140.
- [9] Л. С. Шарупич, Н. М. Тугов. Оптоэлектроника. М.: Энергоатомиздат. 1984.