

# Инжекционные фотоприемники

© И.М. Викулин<sup>¶</sup>, Ш.Д. Курмашев\*, В.И. Стафеев<sup>+</sup>

Академия связи Украины,  
65029 Одесса, Украина

\* Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова,  
65063 Одесса, Украина

<sup>+</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО „Орион“»,  
111123 Москва, Россия

(Получена 9 января 2007 г. Принята к печати 7 июля 2007 г.)

Обобщаются физические принципы работы инжекционных фотодиодов. Обосновывается единый подход к изучению фотоэлектрических явлений в структурах с инжекционным усилением. Обсуждаются физические механизмы инжекционного усиления, параметры и характеристики фотоприемников. Рассмотрены диоды для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра с чувствительностью намного более высокой, чем у безынкционных аналогов.

PACS: 85.60.Dw, 85.30.Kk, 85.60.Gz

## 1. Введение

Инжекционные фотодиоды (ИФД) — новый класс полупроводниковых фотоприемников, исследования которых тем не менее начались несколько десятилетий назад. Изучался механизм обратной связи между объемными и инжекционными процессами в полупроводниках [1]. Диоды, у которых толщина базовой области (расстояние  $d$  между инжектирующим  $p$ - $n$ -переходом и вторым омическим контактом) значительно превышает диффузионную длину неосновных носителей заряда  $L$ , называют „длинными“.

Теория вольт-амперных характеристик диодов на основе высокоомных, компенсированных примесью с глубокими уровнями полупроводников-полуизоляторов ( $p$ - $i$ - $n$ -структуры) развита в [2]. Такие диоды работают при подаче на барьер электрического смещения в прямом направлении. В этом случае основная часть внешнего напряжения  $V$  падает на высокоомной базовой области ( $V_b$ ). При протекании прямого тока  $p$ - $n$ -переход инжектирует в базу неосновные носители заряда, для компенсации объемного заряда которых из второго контакта в полупроводник втекает эквивалентное количество основных носителей тока. При высоких уровнях инжекции концентрация неравновесных носителей заряда значительно превышает концентрацию равновесных и они определяют проводимость базовой области. Приложенное напряжение  $V$  распределяется между  $p$ - $n$ -переходом ( $V_{p-n}$ ) и объемом базы ( $V_b$ ):

$$V = V_{p-n} + V_b.$$

Когда сопротивление базы структуры в результате инжекции уменьшается, доля напряжения на контакте  $V_{p-n}$  увеличивается, приводя к росту инжекции в базу и дальнейшему уменьшению ее сопротивления. Инжекция носителей заряда как бы усиливает эффект изменения сопротивления в объеме и в определенных условиях

может приводить к „срыву“ напряжения — образованию  $S$ -образных вольт-амперных характеристик с участком отрицательного дифференциального сопротивления — ОДС (инжекционная пробой).

Впервые высокая фоточувствительность фотодиодов в пропускном направлении была обнаружена в диодах из германия с примесью золота ( $Ge(Au)$ ) при температуре жидкого азота [1,3,4]. Освещение снижает сопротивление базы  $p^+ - i - n^+$ -структуры. Как и в темноте, это также приводит к перераспределению приложенного напряжения смещения. Напряжение на  $p$ - $n$ -переходе возрастает, усиливается инжекция носителей заряда в базу, что дополнительно снижает ее сопротивление. Именно в этом заключается механизм инжекционного усиления первичного фототока вследствие реализации **положительной обратной связи (ПОС)**.

В ИФД существует и другой механизм усиления фототока [5–8], так называемое **параметрическое усиление**. Инжекция носителей заряда в объем компенсированного полупроводника (полуизолятора) создает в нем неоднородно распределенную в пространстве неравновесную плазму электронов и дырок [9]. Освещение не только повышает концентрацию носителей заряда, но и влияет на параметры, определяющие их распределение в базовой области (время жизни, биполярная дрейфовая подвижность, биполярный коэффициент диффузии и др.). Параметры эти зависят от интенсивности примесного освещения, непосредственно изменяющего заполнение примесных центров (уровней ловушек). Поэтому изменяется проводимость базовой области, происходит перераспределение напряжения между базой и  $p$ - $n$ -переходом, дополнительный рост инжекции и т.д. Именно этот эффект вносит основной вклад в усиление фототока в инжекционных диодах в области примесного поглощения. Поэтому в примесной области с ростом инжекционного тока фоточувствительность возрастает значительно быстрее и может превысить величину чувствительности в области собственного поглощения. При

<sup>¶</sup> E-mail: phys@usat.ukrtel.net

работе фотодетекторов в аналоговом режиме приложенное напряжение и освещенность должны быть такими, чтобы инжекционный пробой („срыв“) еще не наступал.

Промышленность выпускает большое число типов фотоприемников с высокой чувствительностью, например лавинные фотодиоды [7]. Однако их спектральный диапазон чувствительности ограничен областью собственной fotocувствительности материалов, из которых они изготовлены. Для обнаружения световых сигналов в инфракрасной области спектра наряду с узкозонными материалами широко используются примесные полупроводники. Практически только фоторезисторы являются приемниками излучения, проявляющими чувствительность в примесной области спектра. Отсюда следует, что именно ИФД, которые можно представить как фоторезисторы, управляемые инжекцией из контактов, могут быть фотоприемниками, обладающими высокой чувствительностью в спектральном диапазоне, от ультрафиолетовой (УФ) до дальней инфракрасной (ИК) области. Несомненным достоинством ИФД является их большая fotocувствительность к предельно слабым световым сигналам. Большое число работ посвящено переключающему действию освещения [10].

## 2. Коэффициент усиления инжекционных фотодиодов

Феноменологический анализ fotocувствительности ИФД позволяет из общего усиления фототока выделить параметрическое усиление и усиление за счет положительной обратной связи (ПОС) по току [11,12]. В качестве критерия чувствительности диода к внешним воздействиям целесообразно рассматривать отношение его чувствительности к чувствительности эквивалентного (аналогичного) резистора, изготовленного из того же материала, что и база диода, и имеющего те же геометрические размеры. Такое отношение и будет коэффициентом инжекционного усиления прибора (вернее, относительным коэффициентом усиления).

Для стационарного внешнего сигнала коэффициентом инжекционного усиления является отношение

$$K = \frac{S_I}{S_{I_r}} \Big|_{V=V_r} = \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial \omega}\right)_V \Big|_{V=V_r}}{\left(\frac{\partial I_r}{\partial \omega}\right)_{V_r} \Big|_{V=V_r}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — параметр внешнего сигнала любой природы;  $I$  и  $I_r$ ,  $V$  и  $V_r$ ,  $S_I$  и  $S_{I_r}$  — ток, напряжение и дифференциальная токовая чувствительность для длинного диода и аналогичного резистора соответственно.

Коэффициент инжекционного усиления можно представить в виде

$$K = K_I K_\omega, \quad (2)$$

где

$$K_I = \frac{1 - V_r \left(\frac{\partial Y_r}{\partial I_r}\right) \Big|_{\omega}}{1 - V \left(\frac{\partial Y}{\partial I}\right) \Big|_{\omega}} = \frac{Y_r \left(\frac{\partial I}{\partial V}\right) \Big|_{\omega}}{Y \left(\frac{\partial I_r}{\partial V_r}\right) \Big|_{\omega}}, \quad (3)$$

$$K_\omega = \frac{\left(\frac{\partial Y}{\partial \omega}\right) \Big|_{I_r}}{\left(\frac{\partial Y_r}{\partial \omega}\right) \Big|_{I_r}}. \quad (4)$$

Здесь  $Y$  и  $Y_r$  — проводимость базы длинного диода и резистора соответственно. Компонента  $[1 - V \left(\frac{\partial Y}{\partial I}\right)]^{-1}$  является характеристикой обратной связи в диоде. Поэтому коэффициент  $K_I$  отражает вклад, обусловленный ПОС по току, а также различие в крутизне вольт-амперных характеристик (ВАХ) инжекционного диода  $\left(\frac{\partial I}{\partial V}\right) \Big|_{\omega}$  и аналогичного резистора  $\left(\frac{\partial I_r}{\partial V_r}\right) \Big|_{\omega}$ . Если рабочий участок вблизи срыва и на ВАХ устойчив, то и усиление на нем может достигать больших значений, так как  $\left(\frac{\partial I}{\partial V}\right) \Big|_{\omega} \rightarrow \infty$  при  $V \rightarrow V_{br}$  (здесь  $V_{br}$  — напряжение „срыва“). Коэффициент  $K_\omega$  характеризует усиление, не сводящееся к ПОС, так как оно связано с непосредственным влиянием внешнего сигнала на параметры переноса носителей заряда в базе и является параметрическим усилением.

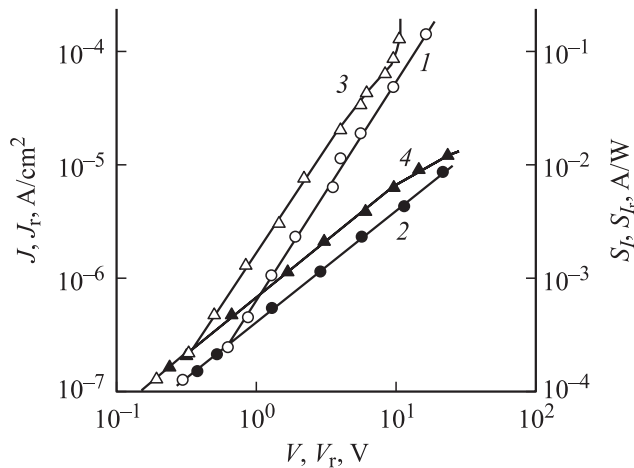
Такой феноменологический анализ применим и к другим инжекционным приборам. Если инжекционное усиление из-за наличия ПОС возможно в любых  $S$ -диодах, то для расчета  $K_\omega$  необходимо рассматривать физическую модель, учитывающую действие конкретного возмущения.

## 3. Механизмы инжекционного усиления

### 3.1. Инжекционный фотодиод с дрейфовым переносом носителей заряда

В диодных структурах с  $d/L \geq 10$  протекающие токи определяются биполярным дрейфом носителей заряда [13–15]. Распределение инжектированных носителей в объеме полупроводника связывают с биполярной подвижностью  $\mu$ , характеризующей направление и скорость движения пакета неравновесных носителей заряда в электрическом поле. В работе [11] на основе модели диода с длинной базой [13] теоретически проанализирован механизм фотоэлектрического инжекционного усиления, не сводящийся к ПОС по току. При напряжении, когда проводимость базы определяется инжектированными из контактов носителями под действием „примесного“ освещения, усиление связано с непосредственной модуляцией  $\mu$ , т.е. является параметрическим.

В работах [16–18] изучалось инжекционное усиление в диодах на основе  $p$ -Ge(Hg). Примесная fotocувствительность этого материала приходится на длину волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 10.6$  мкм) и



**Рис. 1.** Зависимости плотности тока  $J$  (1),  $J_r$  (2) и токовой фоточувствительности  $S_I$  (3),  $S_{I_r}$  (4) от напряжения для инжекционного фотодиода (1,3) и эквивалентного резистора (2,4) при освещении  $CO_2$ -лазером ( $\lambda = 10.6$  мкм) и температуре  $T = 55$  К.

соответствует „окну“ прозрачности атмосферы в области  $\lambda = 8-12$  мкм. При  $T < 77$  К ВАХ диодов с  $d = 0.2-4$  мм были характеристиками S-типа. Участок отрицательного дифференциального сопротивления связан с перезарядкой рекомбинационных центров ртути и включением механизма ПОС по току [13,19]. На рис. 1 (кривые 1 и 2) показаны ВАХ диода и эквивалентного резистора при напряжениях  $V < V_{br}$  [17]. Омический участок ВАХ

$$I = q(\mu_n n_0 + \mu_p p_0) \frac{V}{d} S \quad (5)$$

возникает при низком уровне инжекции, когда концентрация неравновесных носителей заряда меньше концентрации равновесных носителей. Здесь  $n_0, p_0$  — равновесные концентрации электронов и дырок,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — их подвижности,  $S$  — площадь поперечного сечения базы. Такая линейная зависимость  $I$  от  $V$  практически совпадает с ВАХ эквивалентных фоторезисторов.

При модуляции проводимости базы инжекций из контактов

$$I = \frac{9}{8} q |n_0 - \gamma p_0| \mu_n \mu_p \tau_p \frac{V^2}{d^3} S, \quad (6)$$

где  $\gamma = \tau_n / \tau_p$ ,  $\tau_n$  и  $\tau_p$  — упругие времена релаксации электронов и дырок. Квадратичная зависимость тока  $I$  от напряжения  $V$  обусловлена модуляцией проводимости полупроводника инжектированными носителями заряда при их биполярном дрейфе в электрическом поле [13,20–22]. Напряжение перехода от омического участка ВАХ к квадратичному  $V_{1,2}$  равно [9]

$$V_{1,2} \approx \frac{d^2}{\mu_n \tau_n}. \quad (7)$$

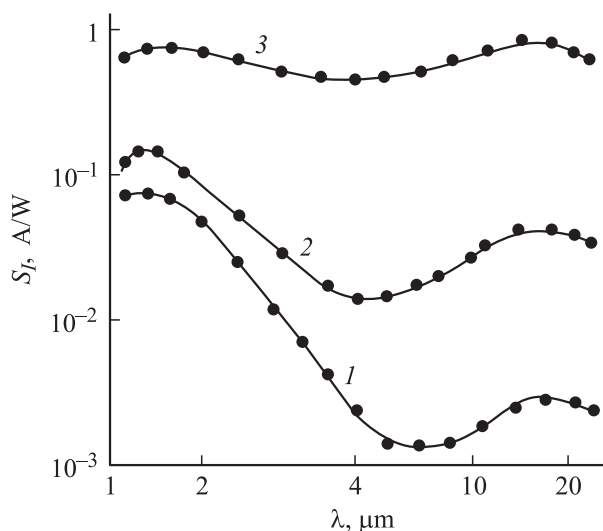
На рис. 1 (кривые 3 и 4) представлены графики характеристик  $S_I(V)$  и  $S_{I_r}(V_r)$  при „примесном“

освещении ( $\lambda = 10.6$  мкм) для ИФД и эквивалентного фоторезистора. Из рис. 1 видно, что  $I(V)$ ,  $I_r(V_r)$  и  $S_I(V)$ ,  $S_{I_r}(V_r)$  подчиняются одним и тем закономерностям. Примерно совпадают наклоны степенных участков, напряжения  $V_{1,2}$  и  $V_{1,2}^{S_I}$  практически одинаковы. Как и темновой ток, фоточувствительность  $S_I$  соответствует уровню модуляции проводимости базы инжекционным током.

Токовая фоточувствительность  $S_I$  измеряется до напряжений, выше которых возрастают шумы или проявляются токовые неустойчивости [23], затрудняющие регистрацию фототока. Если на участке, предшествующем области ОДС, неустойчивости еще не возникают, то величина  $S_I$  инжекционного фотодиода на основе  $p$ -Ge(Hg) может на 2 порядка превышать чувствительность эквивалентного резистора и достигать 10 А/Вт при  $T < 77$  К и  $\lambda = 10.6$  мкм.

Зависимость  $S_I$  от  $V$  для „собственного“ освещения  $p-i-n$ -структуры на основе  $p$ -Ge(Hg) близка к линейной. Спектральные характеристики, приведенные на рис. 2 [17], получены при низком уровне инжекции ( $V = 1$  В), при напряжении, соответствующем „предсрывному“ участку ВАХ ( $V = 20$  В), и при промежуточном значении напряжения — на квадратичном участке ( $V = 10$  В). Видно, что с ростом тока инжекции чувствительность в области примесного поглощения растет быстрее, чем в области собственного поглощения.

Приведенные экспериментальные данные по фоточувствительности ИФД можно объяснить исходя из теории инжекционного усиления фототока в длинных диодах [11]. При низкой температуре концентрация носителей заряда в базе диода на основе  $p$ -Ge(Hg) даже при достаточно высоких уровнях инжекции на несколько порядков меньше концентрации центров с глубокими уровнями. Вследствие этого в большей ча-



**Рис. 2.** Спектральная чувствительность инжекционного фотодиода. Напряжение смещения  $V, В$ : 1 — 1, 2 — 10, 3 — 20.  $T = 55$  К.

сти базы инжекционная перезарядка глубоких центров незначительная и времена жизни носителей практически совпадают с их равновесными значениями. ВАХ диода при освещении на предсрывном участке определяется выражениями (5) и (6), с той разницей, что к равновесным концентрациям  $n_0$  и  $p_0$  добавляются концентрации фотоносителей  $n_{ph}$  и  $p_{ph}$ , генерированных светом [24]. При низком уровне инжекции ВАХ инжекционного фотодиода совпадает с ВАХ эквивалентного фоторезистора. Напряжение перехода с линейного на квадратичный участок при действии света ( $V_{1,2}^{S_I}$ ) определяется приравниванием соответствующих фототоков:

$$V_{1,2}^{S_I} = \frac{\mu_n n_{ph} + \mu_p p_{ph}}{\| (n_0 + n_{ph}) - \gamma(p_0 + p_{ph}) \| - |n_0 - \gamma p_0|} \frac{d^2}{\mu_n \mu_p \tau_p}. \quad (8)$$

При генерации носителей одного знака (примесная засветка) соотношения (8) и (7) эквивалентны, что и наблюдалось на опыте (рис. 1).

При „собственном“ освещении  $n_{ph} = \gamma p_{ph}$  и  $V_{1,2}^{S_I} \rightarrow \infty$ , т.е. зависимость  $S_I = f(V)$  линейная. Для ИФД на основе  $p\text{-Ge(Hg)}$  на участке ВАХ, где  $V < V_{br}$ , инжекционное усиление при воздействии света с  $\lambda = 0.96$  мкм практически не наблюдается. Оно имеет место лишь непосредственно перед инжекционным пробоем.

В числителе известного выражения для биполярной дрейфовой подвижности

$$\mu = \frac{n - p \frac{dn}{dp}}{n\mu_n + p\mu_p} \mu_n \mu_p \quad (9)$$

стоит величина, зависящая от разности концентраций носителей заряда. „Примесное“ освещение, при котором генерируются носители одного знака, изменяет эту разность, модулируя тем самым  $\mu$ , что сильно влияет на концентрацию носителей заряда, инжектированных из контактов. Если учесть это обстоятельство, то можно объяснить деформацию характеристик спектральной чувствительности при разных напряжениях внешнего смещения (рис. 2).

Коэффициент усиления приемников излучения можно определить как отношение фототока (выходной ток фотоприемника), выраженного в электронах в секунду, к числу поглощенных за это же время фотонов. Считается, что каждый поглощенный фотон вызывает генерацию неравновесных носителей заряда. При воздействии „собственного“ освещения коэффициент усиления фоторезистора, как известно [25], равен

$$K_r = \frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}. \quad (10)$$

Здесь  $t_n$  и  $t_p$  — время пролета электронов и дырок через базу диода. При „примесном“ освещении в (10) остается только одно слагаемое.

Коэффициент фотоэлектрического усиления инжекционного фотодиода с ВАХ, соответствующей (6), при

примесном освещении (например, если  $p_{ph} \gg n_{ph}$ ) равен [18]

$$K = \frac{9}{8} \frac{\tau_n}{t_n} \frac{\tau_p}{t_p}. \quad (11)$$

Соответственно коэффициент  $K$  превышает усиление примесного фоторезистора на коэффициент усиления генерационного тока неосновных носителей заряда. Отношение  $\tau_n/t_n$  для ИФД на основе  $p$ -полупроводника и является собственно коэффициентом фотоэлектрического инжекционного усиления при дрейфовом механизме переноса неравновесных носителей заряда в базе диода. Таким образом, за счет инжекционного усиления чувствительность диодных структур к свету может быть повышена в десятки, сотни и тысячи раз.

### 3.2. Модуляция сопротивления базы фотодиода по $\tau$ -механизму

В длинных диодах ток существенно зависит от эффективной длины диффузионного смещения  $L$  [2,26]. Величина  $L$  в свою очередь зависит от ряда параметров, в частности от времени жизни неравновесных носителей тока. В полупроводниках, легированных примесями, дающими глубокие уровни, рекомбинация электронов и дырок идет через эти уровни. Заполнение уровней рекомбинации изменяется при инжекции. Если число инжектированных носителей достаточно велико и заполнение уровней захвата достигает значительных величин, то эффективное время жизни носителей заряда  $\tau$  может сильно возрасть [27]. Резкое возрастание  $\tau$  при достижении определенного уровня инжекции, в условиях сильной перезарядки рекомбинационных уровней, может приводить даже к появлению участка ОДС на ВАХ [3,28].

Эффективное время жизни носителей заряда вследствие перезарядки глубоких центров может меняться также при освещении  $p-i-n$ -структур. В работе [6] рассчитана ВАХ диода из  $n\text{-Ge(Au)}$  с учетом влияния „собственного“ освещения. Использовалась аналитическая модель  $\tau$ -механизма модуляции сопротивления базы [29]. Условием применимости этой модели является возможность значительного (на 3 порядка и более) возрастания времени жизни неосновных носителей заряда с ростом тока. При увеличении уровня инжекции область базы, примыкающая к  $p-n$ -переходу, „заливается“ неравновесными носителями заряда и сопротивление ее уменьшается. По мере роста тока длина низкоомной части базы растет, падение напряжения на ней снижается и может наступить инжекционный пробой. Наиболее чувствительной к свету является высокоомная область базы диода, примыкающая к катоду (для базы  $n$ -типа), которой не достигают инжектированные из  $p-n$ -перехода носители заряда. Фоточувствительность такой структуры может значительно превосходить чувствительность эквивалентного фоторезистора.

### 3.3. Инжекционный фотодиод с диффузионным переносом носителей заряда

В  $p-i-n$ -диодах с не слишком длинной базой ( $d/L = 3-5$ ) распределение концентрации темновых неравновесных носителей заряда вдоль базы описывается биполярным коэффициентом диффузии  $D$  как при низком, так и при высоком уровне инжекции [30,31]. В таких структурах параметрическое инжекционное усиление при „примесном“ освещении может определяться коэффициентом  $D$ , изменяющимся под действием света [32].

В работе [18] экспериментально исследовались диоды на основе  $p\text{-Ge(Hg)}$  с  $d/L < 4$ . ВАХ диода (рис. 3) в основных чертах описывается теорией диффузионного пробоя, развитой в [29], достаточно хорошо отражающей инжекционный пробой в ряде материалов [33,34]. При низком уровне инжекции сопротивление базы практически не модулируется и связь между плотностью тока и напряжением линейная. Далее, с ростом концентрации инжектированных носителей, дырки, поступающие из  $p^+$ -контакта для нейтрализации неравновесных электронов, интенсивно захватываются на уровне примеси ртути. Это приводит к появлению неподвижного положительного заряда и уменьшению  $D$ . Падение напряжения на базе при этом практически не изменяется и ВАХ становится экспоненциальной. Затем, с ростом концентрации инжектированных электронов, коэффициент  $D$  остается постоянным и падение напряжения на толще полупроводника возрастает. При токе, превышающем ток инжекционного пробоя, падение напряжения на базе уменьшается из-за возрастания  $D$  с дальнейшим повышением уровня инжекции (так как по мере перезарядки глубоких уровней ртути скорость захвата дырок уменьшается) и на ВАХ возникает участок ОДС.

На рис. 3 показана зависимость плотности фототока  $J_{ph}$  от напряжения при воздействии „примесного“

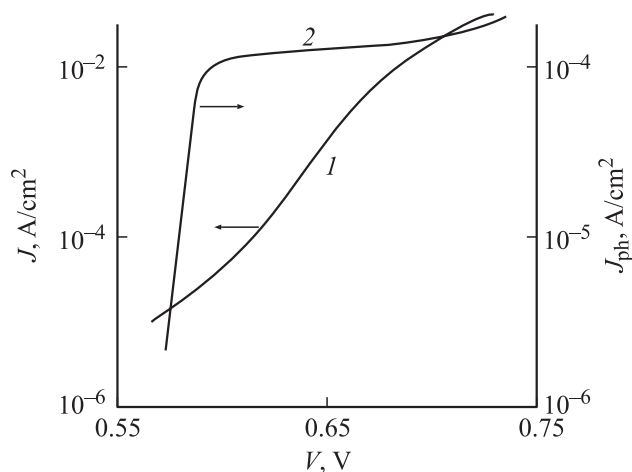


Рис. 3. Зависимость плотности темнового тока  $J$  (1) и фототока  $J_{ph}$  (2) от напряжения.  $T = 55 \text{ К}$ ,  $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ .

освещения с  $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ . В области напряжений, соответствующих экспоненциальному участку на темновой ВАХ, фототок практически не зависит от напряжения, что согласуется с теорией [32]. Диод проявляет инжекционное усиление примесного фототока с коэффициентом усиления  $K = 10^2$ .

### 3.4. Инжекционное усиление при разогреве носителей заряда

Параметры, определяющие распределение неравновесных электронов и дырок в базе диода, могут изменяться не только в результате фотогенерации носителей, но и вследствие разогрева их светом, что и приводит к инжекционному усилению фототока. Подвижность носителей заряда зависит от их энергии, которая возрастает при поглощении электромагнитного излучения. Коэффициент поглощения растет при увеличении длины волны. Поэтому фоточувствительность на этом эффекте простирается до субмиллиметрового диапазона спектра.

В работе [35] проанализированы фототоки  $p-i-n$ -структур с не слишком длинной базой (распределение носителей в  $i$ -слое определяется их диффузией), вызванные поглощением света на свободных носителях, инжектированных в высокоомную базу. Если напряжение, падающее на базу диода, превышает напряжение на переходах, то, как и раньше, можно сравнить чувствительность рассматриваемых структур с чувствительностью аналогичного фоторезистора. Однако при поглощении света на свободных носителях, в отличие от собственного и примесного поглощения, под аналогичным фоторезистором понимают такой, который не только имеет те же размеры и изготовлен из того же материала, что и база диода, но и имеет равновесную концентрацию носителей, равную средней по базе диода концентрации инжектированных носителей. Последнее означает одинаковое поглощение излучения в диоде и резисторе. Для экспоненциального участка ВАХ отношение токовой фоточувствительности диода и резистора может составлять около  $10^2$ . В режиме согласования диода с сопротивлением нагрузки происходит инжекционное усиление фотонапряжения на этом сопротивлении.

В длинных диодах даже при малом разогреве носителей электрическим полем и падающим светом следует учитывать поправки к подвижностям, вероятностям захвата носителей и к степени заселенности рекомбинационных уровней. Слабый разогрев носителей электрическим полем может приводить к появлению на ВАХ вертикального участка постоянного напряжения [19]. При этом стационарный примесный фототок сильно возрастает и возникает его дополнительное (по сравнению с отсутствием полевого разогрева [11]) инжекционное усиление.

Инжекционное усиление при поглощении света на инжектированных носителях может возникать и в диодах, длина базы которых велика настолько, что можно

ограничиться дрейфовыми составляющими электронного и дырочного токов. В работе [36] учтена слабая зависимость подвижности носителей и их времени жизни от напряженности электрического поля. При определенных электрофизических параметрах полупроводника фототок, начиная с некоторого уровня инжекции (начало вертикального участка ВАХ), резко возрастает и инжекционное усиление может составлять несколько порядков.

## 4. Инжекционные фотодиоды с однородной базой

### 4.1. Инжекционные фотодиоды на основе Ge и Si

Некоторые свойства ИФД из германия рассматривались в предыдущих разделах. Действие „примесного“ освещения на инжекционный фотодиод из германия с дрейфовым и  $\tau$ -механизмом переноса неравновесных носителей заряда изучалось в работах [5,37,38] и др. Коэффициент инжекционного усиления диодов из  $n$ -Ge(Au) при воздействии ИК излучения ( $\lambda = 2-8$  мкм) в области „предсрывных“ напряжений при  $T = 54$  К достигал  $2.5 \cdot 10^2$  [24]. При  $\tau$ -механизме усиления освещение вызывает увеличение диффузионной длины, что является причиной высокой фоточувствительности диодов. При монохроматическом освещении прямая ветвь ВАХ диодов из  $n$ -Ga(Au) деформируется при освещенности  $\sim 10^{-5}$  лк и более. С ростом напряжения смещения фоточувствительность диода возрастает. Так, при напряжении  $V \approx 8$  В и освещенности  $3.5 \cdot 10^{-7}$  лк токовая чувствительность  $S_I \approx 120$  А/лм. При той же освещенности чувствительность обычных германиевых фотодиодов составляет не более 30 мА/лм, а фототранзисторов — менее 10 А/лм.

При изучении интегральной и дифференциальной токовой чувствительности инжекционного фотодиода из  $n$ -Ge(Au) [37] экспериментально установлено, что сколько-нибудь значительное инжекционное усиление на сравнительно пологом участке ВАХ при воздействии „собственного“ света отсутствует, т.е. токовая чувствительность  $S_I$  пропорциональна напряжению  $V$ . Параметрическое усиление не реализуется, а усиление вследствие ПОС имеет место лишь на „предсрывном“ участке ВАХ. Оно непосредственно связано с механизмом „самоумножения“ неравновесных носителей заряда и сводится к лавинообразному перераспределению напряжения между контактными областями и базой. В ходе исследований  $p-i-n$ -диодов из  $n$ -Ge(Au) при прямом смещении и было сформулировано понятие „вторичного“ фототока, непосредственно не связанного с изменением концентрации носителей заряда при освещении [3].

На рис. 4 показаны зависимости  $S_I$  от  $V$  для двух диодов [37]. Образец, у которого предпробойный участок

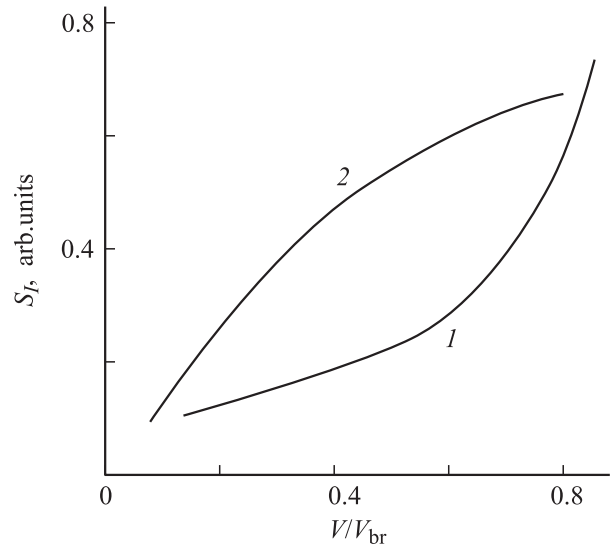


Рис. 4. Зависимость токовой фоточувствительности  $S_I$  от напряжения для двух (1, 2) инжекционных фотодиодов из Ge(Au).  $T = 77$  К.

ВАХ достаточно устойчив (кривая 1), характеризуется резким ростом чувствительности в предсрывной области. Диод, у которого пробой происходит посредством неустойчивости, дает незначительный рост  $S_I$  (кривая 2). Для него обратная связь еще не установилась в полной мере, а „срыв“ уже произошел. Спектральная характеристика диодов равномерна в диапазоне  $\lambda = 0.9-1.6$  мкм и близка к характеристике аналогичного фоторезистора.

В работах [39,40] изучались ИФД, полученные высокотемпературным сплавлением индия в германий. Привлекается модель  $\tau$ -механизма инжекционного пробоя [29]. Спектральная характеристика диода имеет максимум при  $\lambda \approx 1.6$  мкм. Резкий спад фотоответа с уменьшением длины волны связан с влиянием рекомбинации, скорость которой велика на поверхности структур. В средней ИК области имеются максимумы чувствительности при  $\lambda \approx 3.1$  и  $1.6$  мкм. При  $\lambda \approx 3.1$  мкм токовая фоточувствительность  $S_I \approx 9 \cdot 10^2$  А/Вт, вольтовая —  $5 \cdot 10^8$  В/Вт. На фотоответ при воздействии света с  $\lambda \approx 1.6$  мкм сильно влияет стационарная подсветка с  $\lambda \approx 0.9$  мкм. Увеличение ее мощности до  $P \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Вт приводит к существенному росту напряжения фотосигнала, что связано с изменением степени заполнения глубоких уровней в базе диода.

В работе [41] рассмотрено влияние неоднородного нестационарного „примесного“ освещения на прямой ток  $p^+ - i - n^+$ -диода из Ge(In). Показано, что инжекционные фотодиоды обладают неоднородной фоточувствительностью на квадратичном участке ВАХ (рис. 5). При освещении области базы, вблизи  $i - n^+$ -перехода фототок отрицателен вследствие увеличения в зоне освещения скорости рекомбинации инжектированных носителей заряда. В области базы, отстоящей от  $i - n^+$ -перехода дальше освещаемого участка, напряженность



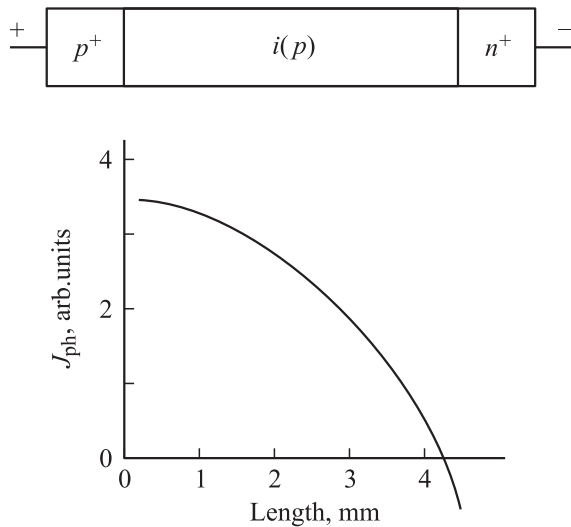


Рис. 5. Зависимость фототока инжекционного фотодиода  $I_{ph}$  от координаты светового зонда.

поля возрастает. Это и определяет увеличение падения напряжения в базе при освещении (отрицательная фоточувствительность).

Свойства ИФД и особенности их характеристик во многом, как указывалось, определяются исходным материалом. Так, максимум спектральной чувствительности кремниевых ИФД наблюдается при  $\lambda \approx 0.98$  мкм, их примесная фоточувствительность простирается до  $\lambda = 6$  мкм. Среди исследованных кремниевых ИФД наиболее чувствительными являются диоды, база которых компенсирована цинком или серой [42,43]. При комбинированном воздействии „собственного“ и „примесного“ освещения на диоды из Si(Zn) наблюдалась неаддитивная фотопроводимость [44]. Она выражается в значительном возрастании примесного фототока при включении „собственного“ освещения. Возможная причина такой неаддитивности — уменьшение поверхностной рекомбинации при воздействии освещения.

#### 4.2. Инжекционные фотодиоды на основе полупроводников $A^III B^V$

Перспективным для создания фоточувствительных приборов с ВАХ S-типа является полуизолирующий GaAs. Применение GaAs существенно расширяет функциональные возможности S-диодов путем использования электронно-фотонных способов ввода, хранения и вывода информации [45]. Такие диоды отличаются большим коэффициентом передачи, быстродействием и являются многофункциональными приборами (излучатель, приемник, элемент с оптическим выводом информации, управляемая линия задержки и т.д.). Высокой чувствительностью обладают диодные структуры из полуизолирующего GaAs с примесью хрома и никеля, полученные методом сплавления [46]. Предпочтение отдается также

получению таких диодов методом эпитаксии из жидкой фазы [47].

Для создания ИФД для ультрафиолетового (УФ) диапазона используются широкозонные соединения GaAs, GaP,  $GaP_xAs_{1-x}$  и др. Они обладают чувствительностью вплоть до  $\lambda = 200$  нм. ИФД на основе GaP имеют максимум чувствительности при  $\lambda = 430-440$  нм. Для GaP-диодов с фоточувствительной площадкой диаметром 15 мм при  $\lambda_{max}$  типичные значения пороговой мощности  $P_{NEP} = (1-2) \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Они обладают широким динамическим диапазоном, линейность амперваттной характеристики сохраняется в пределах удельной мощности  $10^{-12}-10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Наилучшими параметрами в УФ и видимой областях спектра обладают ИФД на основе GaAs(Cr) и ИФД с гетеропереходом  $GaAl_xAs_{1-x}-GaAs$  [48]. Область спектральной чувствительности у них начинается с  $\lambda = 300$  нм. Максимум чувствительности приходится на  $\lambda \approx 800$  нм. „Примесная“ фоточувствительность простирается до  $\lambda = 1300$  нм. Особенно ярко проявляется она при  $T = 77$  К. Наиболее высокой коротковолновой чувствительностью ИФД обладают при освещении со стороны, противоположной инжектирующему p-n-переходу. Токовая фоточувствительность при  $\lambda_{max}$  достигает 500 А/Вт. Коэффициент инжекционного усиления составляет  $K = 10^2-10^3$ . В настоящее время созданы ИФД с пороговой чувствительностью  $P_{NEP} = 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $T = 300$  К и  $P_{NEP} = 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $T = 77$  К. Динамический диапазон ИФД на основе GaAs(Cr) при  $T = 300$  К достигает 4–5 порядков.

Примером использования ИФД из GaAs(Cr) является инфракрасный радиометр — система обнаружения ИК излучения и измерения его интенсивности на фоне шумов, превышающих сигнал на несколько порядков [49]. Входной фотоприемник прибора (ИФД) чувствителен в области спектра  $\lambda = 0.70-0.95$  мкм. Пороговая чувствительность ИФД  $P_{NEP} = 5 \cdot 10^{-16}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (при 77 К) обеспечивает пороговую чувствительность радиометра не выше  $1.5 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (при использовании фотодиода, охлажденного до  $T = 77$  К) и  $3 \cdot 10^{-13}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (без охлаждения).

Фоточувствительные инжекционные гетероструктуры на основе GaAs, имеющие S-образную ВАХ, представляют большой интерес с точки зрения создания высокоэффективных фотоприемников, а также возможности преобразования ИК излучения в видимое [50]. В работе [51] проведено исследование электрофизических характеристик, а также влияния внешнего освещения и магнитного поля на свойства эпитаксиальных структур p-GaAs-i-GaAs-n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-i-GaAs-n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, в которых центральная область представляет собой полуизолирующий GaAs(Cr). Образцы обладали высокой фоточувствительностью в диапазоне длин волн падающего излучения  $\lambda = 0.8-1.6$  мкм. Для объяснения инжекционного пробоя в диодных

структурах на основе GaAs(Cr) предложен ряд механизмов. В некоторых случаях, например в [52], доминирующим механизмом переключения считают реализацию оптической ПОС. Эффект состоит в поглощении растущего с ростом тока рекомбинационного излучения толщи кристалла, что и приводит к уменьшению его сопротивления.

В работе [51] приводятся доказательства  $\tau$ -механизма переключения в GaAs(Cr). Выводы этой работы согласуются с данными по изучению отрицательной фотопроводимости в длинных диодах на основе GaAs(Cr) [53]. Получены спектры примесного фототока при напряжениях на структурах, соответствующих различным участкам ВАХ (до и после переключения). Максимум примесной фоточувствительности наблюдался при  $h\nu = 0.7$  эВ. Для интерпретации результатов использовалась модель, предусматривающая наличие двух типов центров рекомбинации: медленных и быстрых. Сделан вывод о том, что  $\tau$ -механизм является доминирующим в формировании S-образного хода ВАХ. Рост  $\tau$  связан с захватом инжектированных дырок на уровни хрома. Эти данные подтверждают также вывод о  $\tau$ -механизме переключения в гетероструктурах, центральной областью которых является GaAs(Cr) [47].

Двойной инжекцией (с учетом диффузии и дрейфа носителей заряда) объясняется фоточувствительность ИФД на основе GaP с примесью серебра и золота [54]. Высокая чувствительность в области собственного и примесного поглощения ( $S_I = 10^4 - 10^5$  А/Вт) диодов на основе GaP(Cu) связана с инжекционной модуляцией заряда глубоких центров, приводящей к смене знака биполярной дрейфовой подвижности  $\mu$  [55]. Наблюдалась стимуляция фототока в диодах из GaP от „собственной“ подсветки [23] при действии „примесного“ света. Коэффициент инжекционного усиления достигал величины  $3 \cdot 10^3$ .

Фотоэлектрическое инжекционное усиление при воздействии „примесного“ освещения ( $\lambda = 6 - 12$  мкм) изучалось в  $p-i-n$ -структуре с дрейфовым переносом на основе  $p$ -InSb [27]. Приемлемой оказалась модель, предполагающая рекомбинацию через два независимых уровня. Именно для такого случая получено наилучшее соответствие экспериментальных и теоретически рассчитанных ВАХ S-диодов на основе InSb [56]. Чувствительностью ИФД в области собственного и примесного поглощения можно управлять с помощью магнитного поля [25,27,57,58], а также радиационного облучения [59].

#### 4.3. Инжекционные фотодиоды на основе полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>

Инжекционное усилие при действии света из УФ и видимой областей спектра наблюдалось в фотодиодах на основе высокоомного ZnS, полученных термодиффузией серебра [60]. При сравнительно низких напряжениях прямого смещения (40–50 В) и воздействии света с

длиной волны  $\lambda = 0.3$  мкм интегральная токовая чувствительность достигала  $(0.2 - 1.5) \cdot 10^3$  А/Вт, вольтовая чувствительность —  $3 \cdot 10^8$  В/Вт. Предполагалась возможность реализации  $\tau$ -механизма инжекционного усиления. В пользу этого свидетельствует наличие участка сверхлинейности на ампер-ваттной характеристике при сравнительно слабых световых потоках. Чувствительность на этом участке была наибольшей.

В длинных диодах из ZnS наблюдалось также оптическое гашение фототока [61]. Максимумы гашения имели место при длинах волн 0.45, 0.50, 0.58 и 0.8–0.9 мкм. Предполагается, что имеет место оптическая перезарядка локальных центров как при освещении, так и при инжекции носителей заряда из контактов. Наличие инжекции и объясняет гашение темного тока вследствие полного заполнения медленных центров электронами, которое не наблюдается в образцах с неинжектирующими контактами [62].

В ZnS-диоде при прямом смещении эффект гашения во многом определяется механизмом внутреннего усиления, поскольку освещение может существенно изменить эффективную длину диффузии и дрейфа носителей. Возможной причиной гашения может быть также изменение степени заполнения локальных центров под действием примесного освещения, приводящее к уменьшению времени жизни носителей или биполярной дрейфовой подвижности.

Токовая фоточувствительность продольных ИФД-поляриодов на основе монокристаллов CdS [63] составляет  $10^5$  А/Вт при облучении светом с  $\lambda = 510$  нм (мощность излучения  $2 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>, смещение  $\sim 1$  В, темновой ток  $5 \cdot 10^{-10}$  А). Это значительно больше, чем у известных полупроводниковых анализаторов поляризованного излучения. Значительное изменение величины плеохроизма (от  $-0.9$  до  $+0.8$  при изменении длины волны от 515 до 508 нм) может быть использовано для прецизионного определения длины волны монохроматического излучения этого диапазона.

Исследовались также ИФД на основе других групп полупроводников. Так, чувствительность в коротковолновой области спектра проявляют диоды на основе GaSe [64,65]. При  $\lambda = 0.36 - 0.65$  мкм токовая чувствительность составляет  $5 \cdot 10^{-2}$  А/Вт.

## 5. Инжекционные фотодиоды с варизонной базой

Особенностью токопрохождения в варизонных полупроводниках (плавных гетеропереходах) является действие на электронно-дырочную плазму не только приложенного извне электрического поля, но и встроенного квазиэлектрического поля, определяемого наклоном границ запрещенной зоны материала [66–68], которое и обеспечивает большое разнообразие эффектов в структурах с градиентом ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$  [45].



Существование широкозонного окна встроенного („варизонного“) электрического поля приводит к изменению спектральных характеристик фоточувствительности варизонных поверхностно-барьерных структур и  $p-n$ -переходов по сравнению с аналогичными приборами с гомозонной базой вследствие снижения поверхностных рекомбинационных потерь и увеличения эффективной длины смещения неосновных неравновесных носителей заряда [69–72].

Установлено существенное влияние градиента  $\Delta E_g$  на фотоэлектрические явления в длинных диодах [73]. Использование твердых растворов переменного состава может приводить к дополнительному повышению фоточувствительности за счет изменения коэффициента инжекционного усиления фототока, который зависит от того, в какой части базы происходит оптическая генерация неравновесных носителей заряда. Инжекционное усиление выше при встроенном поле, которое способствует затягиванию носителей в глубь базы. Значение и направление  $\Delta E_g$ , уровень инжекции, а также плотность светового потока влияют на спектральные характеристики фоточувствительности длинных варизонных фотодиодов с двойной инжекцией [74].

При наличии встроенного квазиэлектрического поля в базе существенно изменяется еще одна практически важная характеристика структуры — время пролета неосновных носителей заряда через образец, которое определяется дрейфом как в токовом, так и во внутреннем встроенном поле. Например, среднее время пролета инжектированных электронов (база  $p$ -типа) зависит от напряженности  $E_\Delta$  и направления этого поля:

$$\langle t_f \rangle = \frac{dL_p}{D_p + \mu_p L_p E_\Delta}. \quad (12)$$

Из анализа процессов токопереноса инжектированных носителей следует, что встроенные поля могут существенно влиять на крутизну ВАХ структуры. С другой стороны, в соответствии с теорией инжекционного усиления следует ожидать роста коэффициента инжекционного усиления у структур с большей крутизной ВАХ. Для базы из  $p$ -материала

$$K_\Delta = \frac{\langle \tau_n \rangle}{t_f^0} \left( 1 + \frac{\mu_n t_f^0}{d} E_\Delta \right). \quad (13)$$

Здесь  $t_f^0$  — время пролета через базу в отсутствие встроенного поля. Таким образом, тянущее встроенное поле приводит к росту коэффициента инжекционного усиления в  $(1 + \frac{\mu_n t_f^0}{d} E_\Delta)$  раз. Наиболее сильно влияние квазиэлектрического поля проявляется при малых напряженностях внешнего электрического поля в базе, т. е. в начале квадратичного участка ВАХ. Такая ситуация позволяет достичь высокой фоточувствительности ИФД при малом уровне шумов.

В работе [75] исследовалось инжекционное усиление при собственном поглощении полупровод-

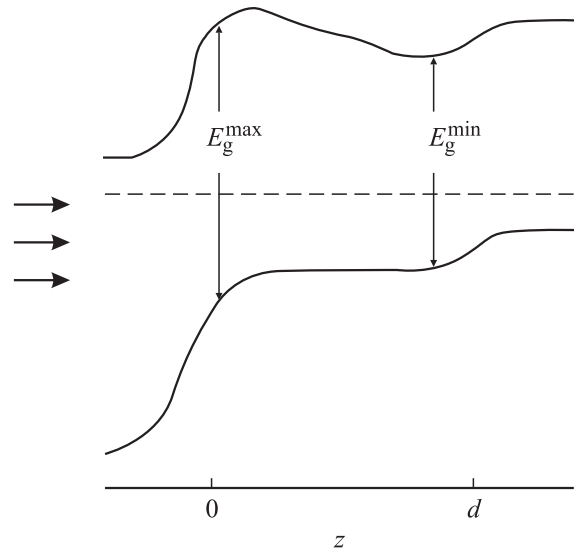


Рис. 6. Энергетическая зонная диаграмма инжекционного фотодиода с варизонной базой.

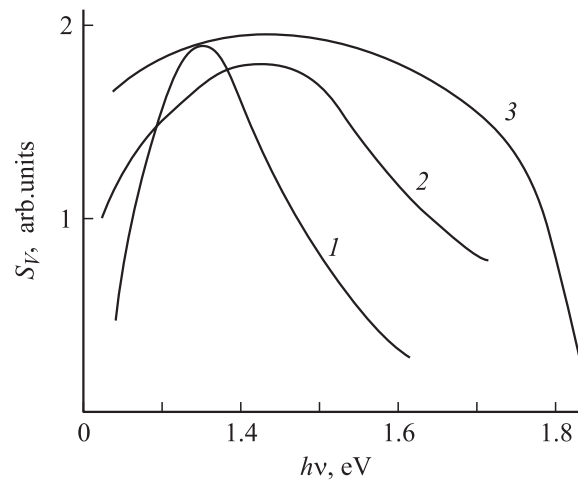


Рис. 7. Спектральная характеристика вольтовой чувствительности инжекционного фотодиода. Ток смещения  $I$ , мА: 1 — 2.5, 2 — 1.5, 3 — 0.4.  $T = 77$  К.

ника, связанное с положительной обратной связью по току. Изучались структуры  $n^+-Al_xGa_{1-x}As-p-Al_xGa_{1-x}As-p^+-GaAs$ , полученные методом жидкофазной эпитаксии (рис. 6). Ширина запрещенной зоны базового материала  $p-Al_xGa_{1-x}As$  изменяется с координатой по линейному закону. Инжектирующий  $n^+-p$ -гетеропереход располагается при  $z = 0$ ,  $p-p^+$ -контакт — при  $z = d$ . Ширина запрещенной зоны базы у  $n^+-p$ -контакта  $E_g(0) = E_g^{max} \approx 1.95$  эВ, у  $p-p^+$ -области —  $E_g(d) = E_g^{min} \approx 1.4$  эВ. Освещение структур проводилось со стороны  $n^+$ -контакта.

Изучалась зависимость дифференциальной вольтовой фоточувствительности  $S_V = dV/dP$  при  $T = 77-300$  К от спектрального состава излучения (рис. 7). Спектральная характеристика фоточувствительности, измеренная

при токе  $I = 2.5$  мА (высокий уровень инжекции), селективна и соответствует световой генерации неравновесных носителей заряда в высокоомной непромодулированной инжектированными из  $n^+ - p$ -гетероперехода носителями заряда области базы у  $p - p^+$ -контакта ( $h\nu \approx 1.4$  эВ). При уменьшении уровня инжекции высокоомная область базы расширяется. Соответственно смещается коротковолновый край спектра fotocувствительности (рис. 7, кривые 2 и 3).

Спектрами fotocувствительности ИФД с варизонной базой можно управлять с помощью магнитного поля [76], которое вследствие проявления гальваномагнитно-рекомбинационного эффекта [77] влияет на распределение носителей заряда в объеме полупроводника. Функциональные возможности фотоприемников существенно расширяются.

## 6. Инжекционный фотодиод с неоднородно легированной базой

Неоднородное распределение компенсирующей примеси по длине образца изменяет токи двойной инжекции, приводит к их зависимости от расположения инжектирующего контакта относительно направления градиента концентрации примеси [78]. В работе [79] анализируются ВАХ при концентрации глубоких центров, экспоненциально изменяющейся с координатой. Токи двойной инжекции в кремнии, неравномерно легированном цинком, исследовали в [80]. Интегральная fotocувствительность таких  $p^+ - n - n^+$ -диодов может быть значительно выше, чем у структур с постоянной по длине базы концентрацией цинка. Наличие градиента примеси приводит к увеличению напряженности электрического поля в базе и к еще более неравномерному распределению этого поля.

В работе [81] исследовалось фотоэлектрическое инжекционное усиление на сверхлинейном (квадратичном) участке ВАХ инжекционного фотодиода с базой  $n$ -типа при неравномерном распределении примесей. Получены уравнения ВАХ диода, в базе которого реализовано экспоненциальное распределение мелкой донорной или глубокой акцепторной примеси. Зависящий от коэффициента диффузии и времени диффузии примеси параметр распределения примеси  $a > 0$ , если максимум ее концентрации находится у  $n - n^+$ -контакта, и  $a < 0$ , если максимум находится у  $p^+ - n$ -перехода. При наличии градиента концентрации примеси коэффициент инжекционного усиления

$$K \approx \frac{9}{8} \frac{\tilde{\tau}_p}{t_p} K_\Delta,$$

где  $\tilde{\tau}_p$  — время жизни дырок в образце с усредненной концентрацией примеси, коэффициент  $K_\Delta$  определяет различие в крутизне ВАХ структур с градиентом концентрации примеси в базе и без него.

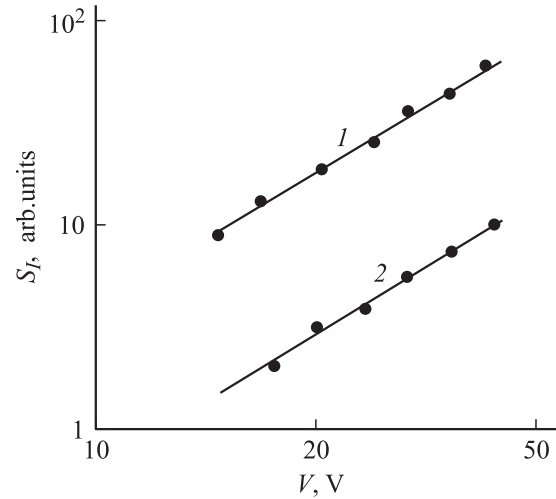


Рис. 8. Зависимости  $S_I = f(V)$  для инжекционных фотодиодов с неоднородно легированной базой. Энергии фотонов  $h\nu = 0.6$  эВ. Параметр распределения примеси  $a$ : 1 —  $a > 0$ , 2 —  $a < 0$ .

Неоднородное легирование базы диода может служить средством управления крутизной ВАХ ИФД и позволяет увеличить коэффициент инжекционного усиления. Экспериментально исследовались ИФД на основе  $n$ -Si(Au) [82]. При длине базы  $d \approx 0.19$  мм отношение концентраций золота на противоположных сторонах кремниевой пластины составляло  $\sim 20$  ( $a \approx 2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$ ). На рис. 8 показаны  $S_I - V$ -характеристики при примесной засветке ( $h\nu \approx 0.6$  эВ) для диодов с  $a > 0$  и  $a < 0$ , изготовленных из одной пластины, в едином технологическом цикле. Отношение между значениями  $S_I$  при фиксированном напряжении составляет примерно 10, что достаточно хорошо соответствует отношению токов при  $a > 0$  и  $a < 0$ . Таким образом, неоднородным легированием базы можно управлять fotocувствительностью на квадратичном участке ВАХ.

В данном случае встроенное поле намного слабее внешнего, поэтому представление о тормозящем или ускоряющем действии квазиэлектрического поля неприемлемо. Зависимость величины  $K_\Delta$  и  $S_I$  от знака  $a$  можно объяснить в терминах рекомбинационного механизма, приведенного в [79].

## 7. Поверхностно-барьерные структуры

При разработке ИФД на основе выпрямляющего контакта металл-полупроводник следует обеспечить достаточно высокий уровень инжекции в объем базы из металлического контакта. Инжекция в поверхностно-барьерных структурах с учетом диффузии и дрейфа рассмотрена в работе [83]. Влияние инжекции неосновных носителей заряда на характеристики поверхностно-барьерных структур в предположении термоэлектронной эмиссии и диффузии изучалось в [84]. Показано,

что инжекция носителей заряда из металла при прямом смещении ограничена, так как подход дырок к контакту (база  $n$ -типа) контролируется термоэлектронной эмиссией. При определенном напряжении смещения  $V$  коэффициент инжекции достигает максимального значения и затем с ростом  $V$  уменьшается. Его можно повысить, если между металлом и полупроводником поместить тонкий диэлектрический слой [85].

Разработаны ИФД на основе структур Ni- $n$ -Si(Au) [86,87]. Диэлектрической прослойкой между металлом и полупроводником служили оксиды SiO<sub>2</sub>. Для получения большого коэффициента инжекции оптимальной является толщина диэлектрической прослойки  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  мкм. Концентрация золота в базе составляла  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Длина базы диода  $d = 0.02$ – $0.05$  см. Наличие участка сверхлинейного роста тока на прямой ветви ВАХ свидетельствует о достаточно сильной модуляции проводимости базы инжекцией из контактов.

При освещении диода со стороны полупрозрачного Ni-контакта проявляется фоточувствительность в области собственного поглощения кремния, более высокая, чем у эквивалентного резистора [88]. В данном случае инжекционное усиление связано с механизмом ПОС по току.

В работе [89] рассмотрена структура Ni- $i$ -CdS- $n^+$ -CdS на основе монокристалла CdS. Усиление фототока в ней при УФ освещении возможно, если увеличен уровень инжекции основных носителей заряда в высокоомную  $n$ -область с нерабочей (неосвещаемой) стороны  $n^+$ - $n$ -перехода. Освещение проводили со стороны полупрозрачного никелевого контакта. Так как толщина высокоомного слоя в рассматриваемом диоде небольшая (менее 8 мкм), со стороны  $n^+$ - $n$ -контакта возможна эмиссия значительного заряда основных носителей (с нарушением зарядовой нейтральности). Значительное инжекционное усиление фототока наблюдается даже при отсутствии контакта с высоким коэффициентом инжекции неосновных носителей в базу. При смещении  $V \approx 6$  В чувствительность структуры в УФ области ( $\lambda \approx 0.22$  мкм) составляет не менее  $5 \cdot 10^3$  А/Вт, при темновом токе  $10^{-8}$  А, что существенно превосходит аналогичные параметры многих созданных до сих пор для этой области спектра твердотельных фотоприемников [90].

## 8. Быстродействие

Важным параметром ИФД, как и других фотоприемников, является их быстродействие. Оно может быть ограничено временем жизни, временем вытягивания неравновесных носителей заряда и др. Время ответа фоторезистора, как известно [91], определяется временем жизни носителей заряда, более всего влияющих на фотопроводимость. При слабом фоновом излучении и низкой температуре становится существенным захват на

ловушки. Рост коэффициента усиления при этом сопровождается увеличением инерционности фоторезистора.

Проводимость базы ИФД при высоком уровне инжекции определяется более долгоживущими носителями, так как

$$\frac{n - (n_0 + n_{ph})}{\tau_n} = \frac{p - (p_0 + p_{ph})}{\tau_p},$$

где  $n$  и  $p$  — полные концентрации электронов и дырок соответственно [24]. Увеличение концентрации более долгоживущих свободных носителей при освещении для сохранения квазинейтральности должно привести к такому же уменьшению концентрации глубоких уровней, заполненных такими носителями. Этот процесс происходит со временем  $t_{max} = f(\tau_n, \tau_p)$ , которое и определяет время фотоответа. Быстродействие ИФД определяется временем жизни более долгоживущих носителей.

Рассчитана фоточувствительность  $p$ - $i$ - $n$ -структур при двойной инжекции носителей заряда с учетом их слабого разогрева электрическим полем в зависимости от частоты ( $f$ ) модуляции „примесного“ освещения [92]. В линейном приближении по интенсивности излучения вычислена частота спада фототока  $f = f_0$  в условиях высокой фоточувствительности. Показано, что частота  $f_0$  уменьшается с ростом стационарного тока, что связано с полевым разогревом носителей. Он приводит к настолько сильной модуляции проводимости толщи полупроводника, что убыль фотоносителей за счет их рекомбинации в течение некоторого времени компенсируется инжекцией из контактов. Частота  $f_0$  существенно зависит от отношения времени жизни электронов и дырок. Найдено значение этого отношения, при котором произведение коэффициента усиления фототока на частоту максимально. Показано, что, в отличие от ситуации на квадратичном участке ВАХ, при инжекционном пробое полупроводника частота  $f_0$  может определяться меньшим из времен жизни носителей заряда, т. е. ИФД могут быть достаточно малоинерционными.

Относительно малую постоянную времени ( $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8}$  с) имеют  $S$ -диоды на основе  $p$ - $i$ - $n$ -структур из GaP(Fe), проявляющих высокую фоточувствительность в области собственного и примесного поглощения [93].

## 9. Пороговые характеристики

Наряду с другими применениями одним из важнейших назначений фотоприемника является обнаружение предельно слабых световых сигналов. С этой точки зрения, как известно (см., например, [94]), существует два предела чувствительности фотоприемников. Один связан с флуктуациями излучения сигнала и характерен для фотоприемников УФ и видимого излучения. Другой определяется флуктуациями фонового излучения, падающего на детектор, и характерен для примесных (ИК) фотоприемников. Именно флуктуациями потока фотонов фона определяется максимально возможная удельная

обнаружительная способность фотоприемника  $D^*$ , работающего в условиях фонового освещения. Такой режим работы приемника называется режимом ограничения  $D^*$  излучением фона. Фоторезисторы могут работать в этом режиме, однако из-за необходимости усиливать полученный сигнал значение  $D^*$  часто ограничивается не собственными шумами приемника, а тепловыми шумами нагрузки или шумами предусилителя. Реальное значение при этом оказывается ниже предельно возможного. По этой причине особенно остро стоит вопрос о создании фотоприемника с внутренним усилением. Именно инжекционный механизм усиления обеспечивает примерно одинаковое усиление как фотосигнала, так и шумов приемника. Поэтому обнаружительная способность  $D^*$  ИФД не хуже, чем у эквивалентных фоторезисторов в одинаковых условиях функционирования (область спектра, температура и т.д.). Чувствительность же у ИФД намного выше.

Для обеспечения высокоомному фотоприемнику широкой полосы пропускания обычно уменьшают сопротивление нагрузки. При этом тепловой шум может оказаться выше шумов фотоприемника. Для установления режима ограничения  $D^*$  фоном необходимо, чтобы генерационно-рекомбинационный шум, связанный с генерацией носителей тока в фотоприемнике фоновым излучением, превосходил все другие шумы. Это означает, что температура приемника должна быть уменьшена до такого значения, при котором скорость тепловой генерации ниже скорости оптической генерации носителей фоновым излучением. Известно, что именно этим обстоятельством и продиктована необходимость охлаждения фотоприемников, предназначенных для регистрации слабых сигналов.

Принципиальный предел обнаружительной способности фотоприемников с объемным фотоэффектом определяется генерационно-рекомбинационными шумами. Экспериментально и теоретически показано [95], что у ИФД с ВАХ вида (6) имеется несколько типов генерационно-рекомбинационных шумов с различной зависимостью тока шума  $I_N$  от напряжения. Рекомбинационный шум инжектированных носителей растет с напряжением, как  $I_N \propto V^{3/2}$  ( $D^* \propto V^{1/2}$ ). Генерационно-рекомбинационный шум, связанный с флуктуациями скорости генерации и рекомбинации генерированных носителей заряда, зависит от напряжения так же, как и фототок ( $I_N \propto V^2$ ). При этом величина обнаружительной способности фотоприемника  $D^*$  максимальна ( $D^* \propto V^2$ ). Шум соответствует усиленным флуктуациям той части потока фонового излучения, которая поглощается в базе. Режим „ограничения  $D^*$  фоном“ наблюдался для диодов на основе  $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ ,  $n\text{-Ge}\langle\text{Cu}\rangle$ ,  $p\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$  и  $p\text{-Ge}\langle\text{Hg}\rangle$ . У таких ИФД как и у эквивалентных фоторезисторов, при поглощении примесного света следует учитывать неоднородность поглощения как „сильного“, так фонового излучения, если они распространяются вдоль электрического поля в базе [96]. Вследствие такой неоднородной пространственной модуляции проводимости объема полупровод-

ника фоновым излучением спектральная характеристика фотоответа должна совпадать со спектром квантовой эффективности. Таким образом, спектральная характеристика фотоприемника существенно зависит от длины волны, мощности и направления излучения.

## 10. Некоторые перспективы применения инжекционных фотодиодов

### 10.1. Линейные и матричные ПЗС-приемники изображения

В известных линейных приемниках изображения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) в качестве фотоприемных элементов обычно используют МДП конденсаторы, диоды Шоттки и др. элементы, не имеющие внутреннего усиления. Возможно создание линейных ПЗС-приемников изображения (ЛПЗС-ПИ) широкого спектрального диапазона, в которых приемные элементы выполнены на фотодиодах с внутренним усилением. Пример конструкции ЛПЗС-ПИ представляет собой чувствительное в области примесного поглощения устройство, содержащее подложку из компенсированного кремния или фосфида галлия, компенсированного медью. В ней вертикально расположены инжекционные фотодиоды, соединенные через управляющие МДП транзисторы с соответствующими входами многоходового ПЗС-регистра сдвига, изготовленного на кремниевой эпитаксиальной пленке, нанесенной на подложку.

Совпадение постоянных решеток кремния и фосфида галлия позволяет использовать последний в конструкции ЛПЗС-ПИ для расширения их спектрального диапазона в видимую и УФ области спектра. В случае освещения светом из области собственного поглощения расположение фотодиодов в подложке возможно по планарному варианту.

### 10.2. Инжекционные фотодиоды с микробарьерами

Фотоприемниками с внутренним усилением, чувствительными к „примесному“ и „собственному“ освещению, являются структуры с неравновесным рекомбинационно-ловушечным барьером, возникающим при световой или электрической инжекции в компенсированном полупроводнике с неоднородным распределением глубоких примесей [97]. Полупроводник представляет собой две чередующиеся области с различными концентрациями ловушек и такими уровнями компенсации, когда без освещения на границе раздела областей высота барьера не превышает нескольких  $kT$ . При освещении такой структуры светом из области собственного поглощения на границе раздела областей возникает потенциальный барьер, высота которого может существенно превосходить  $kT$ , а напряженность поля в барьере достигать  $10^5$  В/см и более. Высота барьера может сильно

зависеть от „собственного“ и „примесного“ освещения [98]. Токовая фоточувствительность может превышать один электрон на фотон, т.е. структура с таким барьером обладает внутренним усилением. Имеется возможность создавать рекомбинационно-ловушечный барьер в широкозонных полупроводниках при инжекции носителей из  $p-n$ -перехода.

Линейные и матричные фотоприемники могут быть изготовлены на основе гибрида неравновесных рекомбинационно-ловушечных барьеров и многоходовых регистров сдвига на ПЗС. Барьеры для создания линеек и дискретных фотоприемников могут быть созданы как на основе компенсированного кремния, так и другого широкозонного материала, который может быть нанесен на кремний. При создании матричного варианта приемника должен быть использован только кремний. Поскольку фотоприемники создаются на основе компенсированных материалов и имеют большое внутреннее сопротивление, ввод информации можно сделать достаточно эффективным при подаче сигнала на входной затвор ПЗС. При этом барьер работает в режиме короткого замыкания по переменному току. Если напряжение сигнала подается на затвор, фотоприемник работает в режиме вентильной фотоэкс. В обоих случаях через фотоприемник не текут постоянные токи. Поэтому уровень шумов в нем невелик.

## 11. Заключение

Инжекционные фотоприемники обеспечивают на несколько порядков ( $10^2-10^5$ ) более высокую фоточувствительность, чем безыножекционные структуры. Не требуется использование малошумящих усилителей, стоящих непосредственно после фотоприемника и обладающих столь большими коэффициентами усиления, что их стабильность очень невысока.

Большой коэффициент инжекционного усиления позволяет реализовать ситуацию, когда генерационно-рекомбинационные шумы носителей заряда, генерированные фоновым излучением окружающей среды, превышают избыточные шумы, связанные с поверхностью и контактами. Это дает возможность добиться высоких значений детектирующей способности  $D^*$ .

В фотоприемнике с инжекционным усилением усиливаются как собственные шумы, так и сигнал. При этом шумы нагрузки и предусилителя оказываются несущественными. Это особенно важно при использовании устройств в режиме, близком к короткому замыканию. Такая ситуация может иметь место, например, в космосе, где уровень засветки, определяющей темновое сопротивление фотоприемника, ничтожно мал.

Инжекционные фотоприемники могут работать в широком спектральном диапазоне, включая ультрафиолет, видимый, ближний и дальний (вплоть до субмиллиметрового) диапазоны спектра. В отличие от фотоприемников с лавинным умножением, для которых спектральный

диапазон ограничен областью собственной фоточувствительности материалов, ИФД позволяют получить чувствительность в области энергии активации глубоких примесных центров.

Важным достоинством ИФД является их высокая технологичность и слабая зависимость от свойств поверхности. Это связано с тем, что они работают в пропускном направлении, поэтому качество инжектирующего  $p-n$ -перехода и его утечки не играют существенной роли. Эти факторы существенно упрощают практическое использование фотоприемных устройств данного типа и обеспечивают их повышенную стабильность и надежность.

Реализация инжекционного усиления в рекомбинационно-ловушечных барьерах открывает перспективы создания ИФД на основе квантово-размерных структур. С этой точки зрения интерес представляют работы по изучению элементарных структурных единиц конденсированных фаз и связанных с их элементарным зарядом явлений [99].

## Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, В.И. Стафеев, В.М. Тучкевич. ЖТФ, **24**, 2131 (1956).
- [2] В.И. Стафеев. ЖТФ, **28**, 1631 (1958).
- [3] В.И. Стафеев. ФТТ, **1**, 841 (1959).
- [4] V.I. Stafeev, V.M. Tuchkevich. *Rep. 19<sup>th</sup> Ann. Conf. Phys. Electr.* (MIT, Cambridge, Massach., 1959) v. 1, p. 139.
- [5] В.И. Стафеев. ФТП, **3**, 2513 (1961).
- [6] Б.М. Гарин, В.И. Стафеев. ФТП, **6**, 76 (1972).
- [7] И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев. *Полупроводниковые фотоприемники*, под ред. В.И. Стафеева (М., Радио и связь, 1984) гл. 5, с. 101.
- [8] И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев. *Фотоприемники с инжекционным усилением* (М., ЦНИИ „Электроника“, 1989).
- [9] M. Lampert, P. Mark. *Current injection in solids* (Academic Press, N.Y.-London, 1970).
- [10] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Полупроводниковые датчики* (М., Сов. радио, 1975) гл. 3. с. 33.
- [11] Б.М. Гарин, В.И. Стафеев. Сб. трудов МФТИ. Сер. Радиотехника и электроника (М., Изд-во МФТИ, 1972) вып. 2, с. 88.
- [12] Б.М. Гарин. РЭ, **38**, 149 (1983).
- [13] В.В. Осипов, В.И. Стафеев ФТП, **1**, 1796 (1967).
- [14] А.И. Бараненков, В.В. Осипов. ФТП, **5**, 836 (1971).
- [15] А.И. Бараненков, В.В. Осипов. ФТП, **3**, 39 (1969).
- [16] И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Андреев. ФТП, **13**, 166 (1979).
- [17] И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Андреев. ФТП, **13**, 460 (1979).
- [18] Sh. Kurmashev, V. Stafeev, I. Vikulin. Proc. SPIE, **3182**, 59 (1997).
- [19] Р.Ф. Казаринов, В.В. Осипов. ФТП, **3**, 810 (1969).
- [20] W. Weber, C. Ford. Sol. St. Electron., **13**, 1333 (1970).
- [21] R. Knepper, A. Jordan. Sol. St. Electron., **15**, 45 (1972).
- [22] K. Hiroshi. J. Appl. Phys., **53**, 5061 (1982).

- [23] Г.А. Найда, Б.М. Орлов, И.Е. Острый. *Научные труды по проблемам микроэлектроники* (М., МИЭТ, 1976) вып. 27, с. 78.
- [24] Н.Б. Залетаев, В.П. Никифорова, В.И. Стафеев. ФТП, **12**, 1719 (1978).
- [25] R. Bube. *Photoconductivity of solids* (J. Wiley and Sons. Inc., N.Y.–London, 1960).
- [26] В.И. Стафеев, Э.И. Каракушан. *Магнитодиоды* (М., Наука, 1975) гл. 2, с. 27.
- [27] Ш.Д. Курмашев, О.Б. Шевчук, И.М. Викулин, А.А. Градобоев. *Фотоэлектроника*, № 9, 86 (2000).
- [28] В.П. Сондаевский, В.И. Стафеев. ФТП, **6**, 80 (1964).
- [29] Р.Ф. Казаринов, В.И. Стафеев, Р.А. Сурис. ФТП, **1**, 1293 (1967).
- [30] А.С. Алмазов, Е.В. Куликова, В.И. Стафеев. ФТП, **7**, 319 (1973).
- [31] В.В. Осипов, В.А. Холоднов. ФТП, **5**, 1387 (1971).
- [32] Т.Г. Лалаева, В.А. Холоднов. ФТП, **14**, 1175 (1980).
- [33] N. Holonjak. Proc. IRE, **50**, 2421 (1962).
- [34] М.Е. Алексеев, И.В. Варламов, Э.А. Полторацкий, В.П. Сондаевский. ФТП, **3**, 1787 (1969).
- [35] И.И. Блохин, В.В. Осипов, В.И. Стафеев, В.А. Холоднов. РЭ, **25**, 1702 (1980).
- [36] И.И. Блохин, В.В. Осипов, В.И. Стафеев, В.А. Холоднов. РЭ, **26**, 1573 (1981).
- [37] Н.Б. Залетаев, К.М. Куликов, В.П. Никифорова, В.И. Стафеев. ФТП, **8**, 39 (1974).
- [38] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. *Фоточувствительность полупроводниковых структур с глубокими уровнями* (Ташкент, Фан, 1981).
- [39] А.А. Вилисов, В.П. Воронков, В.И. Диамант. ФТП, **10**, 1342 (1976).
- [40] А.А. Вилисов, В.П. Воронков, В.И. Диамант. Изв. вузов СССР. Физика, № 6, 152 (1975).
- [41] А.Н. Власов, Н.Б. Залетаев, В.П. Никифорова, В.И. Стафеев. ФТП, **16**, 1059 (1982).
- [42] В.М. Арутюнян. *Микроэлектроника*, № 11, 539 (1982).
- [43] А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Н.А. Султанов. *Полупроводниковые приборы и их применение*, под ред. Я.А. Федотова (М., Сов. радио, 1974) вып. 28, с. 200.
- [44] А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Н.А. Султанов. ФТП, **7**, 1636 (1973).
- [45] Ж.И. Алфёров. *Физика сегодня и завтра* (Л., Наука, 1973) с. 61.
- [46] Г.А. Егизарян, В.И. Мурыгин, В.С. Рубин, В.И. Стафеев. ФТП, **3**, 1652 (1969).
- [47] В.М. Андреев, Л.М. Долгинов, Д.Н. Третьяков. *Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов*, под ред. Ж.И. Алфёрова (М., Сов. радио, 1975).
- [48] Т.В. Аверьянова, И.Д. Анисимова, Т.В. Рудовол, В.И. Стафеев. РЭ, **26**, 2563 (1976).
- [49] Ю.А. Абрямян, И.Д. Анисимова, В.П. Каляева, Э.Г. Мирзабекян, И.И. Михайлов, Р.Г. Симонян, В.И. Стафеев. *Опт.-мех. пром-ть*, № 9, 71 (1978).
- [50] Ж.И. Алфёров, В.И. Корольков, В.Т. Никитин, Д.Н. Третьяков. ФТП, **5**, 1503 (1971).
- [51] Ж.И. Алфёров, В.К. Ергаков, В.И. Корольков. ФТП, **4**, 2035 (1970).
- [52] W.P. Dumke. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Physics in Semicond. (Paris, 1964) v. 2, p. 611.
- [53] Г.П. Пека, В.А. Бродовой, Л.З. Мирец. ФТП, **9**, 80 (1975).
- [54] М.Н. Икизли, Д.Н. Наследов, Г.В. Слободчиков. ФТП, **11**, 89 (1971).
- [55] В.И. Мурыгин. ФТП, **7**, 858 (1973).
- [56] Т.Г. Лалаева, В.А. Холоднов. ФТП, **14**, 1175 (1980).
- [57] А. Беркелиев, А. Мередов, К. Дурдыев. Изв. АН ТССР. Сер. Физика, № 1, 28 (1979).
- [58] Ш.Д. Курмашев, О.Б. Шевчук, И.М. Викулин, А.А. Градобоев. *Фотоэлектроника*, № 9, 91 (2000).
- [59] Sh. Kurmashev, I. Vikulin, S. Nikifirov. *Photoelectron.*, № 15, 63 (2006).
- [60] В.В. Лосев, Б.М. Орлов, В.И. Стафеев. ФТП, **9**, 41 (1975).
- [61] Ш.А. Алимов, В.В. Лосев, Б.М. Орлов, В.И. Стафеев. ФТП, **10**, 1830 (1976).
- [62] А.В. Любченко, М.К. Шейнкман. *Укр. физ. журн.*, **18**, 291 (1985).
- [63] И.М. Колдаев, В.В. Лосев, Б.М. Орлов. ФТП, **18**, 1316 (1984).
- [64] Г.Б. Абдуллаев, В.И. Стафеев, А.З. Мамедова. РЭ, **22**, 1460 (1977).
- [65] Г.Б. Абдуллаев, Н.Б. Залетаев, А.З. Мамедова, В.И. Стафеев. РЭ, **24**, 1430 (1979).
- [66] H. Greger. *RCA Rev.*, **18**, 332 (1957).
- [67] Ж.И. Алфёров. ФТП, **11**, 2072 (1977).
- [68] О.В. Константинов, Г.В. Царенков. ФТП, **10**, 720 (1976).
- [69] Г.В. Царенков. ФТП, **9**, 253 (1975).
- [70] А.Я. Вуль, С.Г. Петросян, А.Я. Шик, Ю.В. Шмарцев. ФТП, **10**, 673 (1976).
- [71] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.М. Коган. *Письма ЖТФ*, **3**, 725 (1977).
- [72] А.В. Беркелиев, Ю.А. Гольдберг, А.Н. Именков, Б.В. Царенков. ФТП, **12**, 96 (1978).
- [73] Г.П. Пека, А.Н. Смоляр, Д.А. Пулеметов. ФТП, **18**, 478 (1984).
- [74] Г.П. Пека, Д.А. Пулеметов, А.Н. Смоляр. ФТП, **18**, 1480 (1984).
- [75] Ш.Д. Курмашев, В.И. Ирха, И.М. Викулин. ФТП, **24**, 558 (1990).
- [76] Ш.Д. Курмашев, В.И. Ирха, И.М. Викулин, А.А. Градобоев. *Электрон. техн. Материалы*, № 4, 27(1991).
- [77] Сб. статей *Электроника в полупроводниках*, под ред. Ю. Пожелы (Вильнюс, Моклас. 1980) т. 2. гл. 2, с. 73.
- [78] А. Милнс. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* Пер. с англ. под ред. М.К. Шейнкмана (М., Мир, 1977). [A.G. Milnes. *Deep impurities in semiconductors* (J. Wiley & Sons, Inc., N.Y.–London–Sydney–Toronto, 1973)].
- [79] E. Schibli, A.G. Milnes. *Sol. St. Electron.*, **10**, 97 (1967).
- [80] Ф.В. Гаспарян, З.Н. Адамян, В.М. Арутюнян. *Кремниевые фотоприемники* (Ереван, Изд-во Ереван. ун-та, 1989).
- [81] И.И. Синина, Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин. ФТП, **20**, 2233 (1986).
- [82] Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин, Р.Г. Сидорец. *Фотоэлектроника*, № 12, 33 (2003).
- [83] D.L. Scharfetter. *Sol. St. Electron.*, **8**, 292 (1965).
- [84] M.A. Green, J. Schewchun. *Sol. St. Electron.*, **16**, 1141 (1973).
- [85] H.G. Card, E. Rhoderick. *Sol. St. Electron.*, **16**, 365 (1973).
- [86] Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин, И.И. Чалая. ФТП, **22**, 2211 (1988).
- [87] Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин, Р.Г. Сидорец, А.Н. Софронков. *Фотоэлектроника*, № 11, 23 (2002).



- [88] Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин, С.В. Ленков, Р.Г. Сидоренко. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, № 6, 16 (2002).
- [89] И.М. Колдаев, В.В. Лосев, Б.М. Орлов. Письма ЖТФ, **10**, 853 (1984).
- [90] Ж.И. Алфёров, А.Т. Гореленок, В.Г. Данильченко. Письма ЖТФ, **9**, 1516 (1983).
- [91] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Физматлит, 1963).
- [92] И.К. Блохин, В.А. Холоднов. ФТП, **15**, 1994 (1981).
- [93] С.Т. Воронин, А.Ф. Кравченко, А.П. Шерстяков. ФТП, **20**, 1847 (1986).
- [94] Р.Дж. Кнес. *Фотоприемники видимого и ИК диапазона*. Пер. с англ. под ред. В.И. Стафеева (М., Мир, 1985).
- [95] Н.Б. Залетаев, П.С. Серебрянников, В.И. Стафеев. ФТП, **16**, 324 (1982).
- [96] И.К. Блохин, В.А. Холоднов. ФТП, **20**, 294 (1986).
- [97] В.И. Стафеев, А.В. Ельцов, ФТП, **10**, 930 (1976).
- [98] А.В. Ельцов, В.И. Стафеев. ФТП, **10**, 549 (1976).
- [99] В.И. Стафеев. Прикл. физика, № 1, 31 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

## Injection photodetectors

*M. Vikulin, Sh.D. Kurmashev\*, V.I. Stafeev<sup>+</sup>*

Ukraine Academy of Communication,  
62029 Odessa, Ukraine

\* Mechnikov Odessa National University,  
65063 Odessa, Ukraine

<sup>+</sup> Federal State Unitary Enterprises «R&DP „Orion“»,  
111123 Moscow, Russia

**Abstract** The physical principles of the operation of injection photodiodes have extended in this paper. The united point view of the studying of photo-electric phenomena in the structure with an injection amplification was grounded. The physical mechanisms of the injection amplification, parameters and characteristics of the photodetectors are discussed. The diodes for ultra-violet, visible and infrared spectral regions was considered. The photosensitive of such devices is more higher than that of the without-injection analog detectors.