

УДК 621.315.592

ДЕТЕКТОРЫ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ InP/InGaAs/InP

© В. В. Преображенский, И. Б. Чистохин, М. А. Путято,
Н. А. Валишева, Е. А. Емельянов, М. О. Петрушков, А. С. Плешков,
И. Г. Неизвестный, И. И. Рябцев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: pvv@isp.nsc.ru*

Обсуждаются вопросы разработки и изготовления детектора одиночных фотонов на базе однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД) InP/InGaAs/InP, работающих в гейгеровском режиме на телекоммуникационной длине волны 1550 нм. Приведено описание конструкции ОЛФД, способа получения гетероструктуры InP/InGaAs/InP методом молекулярно-лучевой эпитаксии, изготовления чипа ОЛФД методами планарной технологии, особенностей избирательного легирования цинком *p*-областей в слое InP, разработанных электронных схем измерения основных параметров ОЛФД. Представлены предварительные результаты измерений параметров, изготовленных ОЛФД.

Ключевые слова: детектор одиночных фотонов, лавинный фотодиод, гейгеровский режим, гетероструктура, InP/InGaAs/InP, ВАХ, темновой ток, квантовая эффективность счёта, частота темновых импульсов, коэффициент послепульсаций, молекулярно-лучевая эпитаксия, избирательное легирование.

DOI: 10.15372/AUT20210506

Введение. Основной задачей квантовой криптографии является передача секретной информации посредством квантовых объектов — одиночных фотонов, при этом абсолютная секретность передачи обеспечивается законами квантовой механики: одиночные фотоны не могут быть перехвачены и измерены с абсолютной достоверностью [1]. С помощью одиночных фотонов в квантовом канале (оптоволоконной или атмосферной линии связи) генерируется только секретный двоичный ключ, который затем однократно используется отправителем и получателем в симметричной криптосистеме, а само зашифрованное сообщение может передаваться по любому открытому каналу [2–4]. За рубежом уже разработаны коммерческие образцы оптоволоконных квантово-криптографических систем связи [5].

Для полной секретности генерации квантового ключа требуется присутствие не более одного фотона в каждом лазерном импульсе, поэтому к фотодетекторам приёмного узла предъявляются высокие требования. Основными требованиями к детекторам одиночных фотонов в оптоволоконных квантовых линиях связи являются: высокая квантовая эффективность счёта (>15 %) в спектральном диапазоне 1,3–1,55 мкм, низкий уровень темновых шумов (<50 кГц), достаточно высокое быстродействие, малые размеры и низкое энергопотребление [2]. В отличие от фотоэлектронных умножителей (низкая квантовая эффективность <1 %) и сверхпроводниковых детекторов (охлаждение до гелиевых температур) [6] оптимальным выбором являются полупроводниковые ОЛФД, имеющие достаточно высокую квантовую эффективность (15–20 %) и уровень шумов <50 кГц при их охлаждении термоэлектрическими микрохолодильниками Пельтье до температуры 210–230 К.

Такие фотодиоды в настоящее время производятся только за рубежом. Они выпускаются серийно и имеют длительный срок службы. Основными производителями ОЛФД для оптоволоконных квантовых систем связи в настоящее время являются компании WOORIRO Co., Ltd. (Южная Корея), Micro Photon Devices (Италия) и The RMY

Electronics (Гонгконг) [7]. Главная отличительная особенность данных ОЛФД — предельно низкий обратный темновой ток ($<10^{-10}$ А) вблизи пробойного напряжения. Отметим, что детекторы одиночных фотонов на спектральный диапазон 1,3–1,55 мкм востребованы также для других применений (биология, разбраковка интегральных схем, лидарные системы и т. д.), в которых требуется регистрация предельно низких световых потоков.

Для создания и внедрения российских систем однофотонной квантовой связи необходимо организовать разработку и производство аналогичных ОЛФД в России. Нами были выполнены работы по конструированию, изготовлению и исследованию опытных образцов таких ОЛФД, которые имеют параметры, не уступающие зарубежным аналогам. В представленной работе дано краткое описание конструкции, технологии изготовления и результатов измерений данных образцов.

Принцип работы и конструкция ОЛФД. Широкое применение получили ОЛФД на основе твёрдых растворов $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, согласованных по постоянной кристаллической решётки с подложкой InP , что важно для эпитаксиального роста бездефектных гетероструктур, обеспечивающих получение малых темновых токов фотоприёмников при больших напряжениях пробоя и имеющих длинноволновую границу 1,7 мкм. При этом применяют структуру с разделёнными областями поглощения и умножения [8]. Это обусловлено тем, что с увеличением приложенного напряжения растёт и межзонный туннельный ток. При значениях напряжения, близких к лавинному пробоя, в поглощающем слое InGaAs эта компонента тока становится преобладающей. Резкое снижение туннельных токов в ОЛФД можно обеспечить за счёт использования гетероструктур с металлургической границей p - n -перехода в широкозонном полупроводнике (InP). Для достижения высоких характеристик ОЛФД параметры гетероструктуры должны быть такими, чтобы в рабочем режиме область пространственного заряда (ОПЗ) проникала в «узкозонный» фотопоглощающий слой InGaAs , а процесс лавинного размножения носителей развивался лишь в широкозонном слое. Для счёта фотонов используется так называемый гейгеровский режим, при котором подаётся обратное смещение, большее, чем напряжение пробоя, примерно на 10–20 %. Основной проблемой является возникновение послепульсаций и обеспечение быстрого гашения возникающего импульса лавины в целях регистрации следующих фотонов. Принцип работы ОЛФД подробно описан в [9, 10].

В системах квантовой криптографии используется стробируемый режим, в котором, помимо постоянного обратного смещения на несколько вольт ниже напряжения пробоя V_b , подаются периодические импульсы напряжения с амплитудой, превышающей напряжение V_b , синхронизованные с проходящими фотонами. Если длительность импульсов короткая (~ 1 нс), то амплитуда лавинного тока мала и не успевает развиться до максимальных значений, что даёт возможность уменьшить шумы, вероятность послепульсаций и увеличить эффективность счёта фотонов [11].

На рис. 1 показано поперечное сечение разработанной в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова (ИФП) СО РАН конструкции ОЛФД, где ввод светового излучения осуществляется с планарной стороны. Однофотонный лавинный фотодиод представляет собой планарно выполненную структуру диода круглого сечения с диаметром рабочей площадки 20 мкм и контактным выводом диаметром 200 мкм, расположенным на толстом диэлектрическом слое SiO_2 толщиной 0,5 мкм. Выбор конструкции гетероструктуры $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ был сделан на основе анализа данных [8–10, 12–14].

Многослойная гетероструктура в совокупности с локальной диффузией Zn , металлизацией и диэлектрическими слоями состоит из следующих частей:

- 1) тыльная сторона сильно легированной подложки n^+ - InP с контактом;
- 2) буферный слой n^+ - InP толщиной 1 мкм и концентрацией примеси $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
- 3) поглощающий i -слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ толщиной 1–1,5 мкм с концентрацией примеси $<10^{15} \text{ см}^{-3}$;

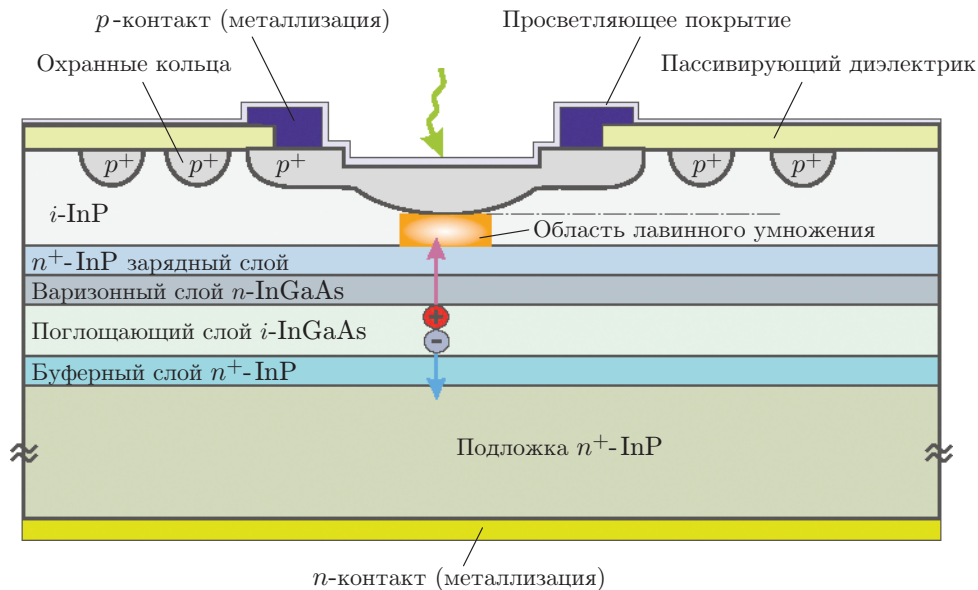


Рис. 1. Поперечное сечение конструкции ОЛФД, разработанного в ИФП СО РАН

4) слой градиентного состава $i\text{-In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{As}$ толщиной 20–50 нм с концентрацией примеси $(1\text{--}5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

5) слой $n\text{-InP}$ (charge) толщиной 200 нм с концентрацией примеси $(1\text{--}2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для создания перепада электрического поля;

6) i -слой InP толщиной 3,5 мкм с концентрацией примеси $<10^{15} \text{ см}^{-3}$;

7) p -область, локально легированная в i -слое InP, диаметром 20 мкм, создаваемая диффузией Zn через окно SiO_2 (после создания легированной p -области толщина области лавинного умножения составит 0,3–1,0 мкм);

8) кольцевая металлизация Ti/Zn/Au к p -области, создающая контакт.

Основными выходными параметрами ОЛФД являются: темновая частота счёта (Dark Current Rate, DCR) — импульсы тока вызваны темновым зарядом вместо падающего фотона, квантовая эффективность счёта PDE — вероятность того, что падающий единичный фотон инициирует импульс тока, и коэффициент послепульсаций — вторичные тепловые импульсы, которые могут увеличить общий темновой счёт и вероятность ложных срабатываний. В коммерчески выпускаемых ОЛФД, работающих на длине волны 1,55 мкм, DCR составляет величину менее 50 кГц, PDE — 15–20 %, коэффициент послепульсаций — менее 15 %.

Принцип счёта фотонов в ОЛФД состоит в следующем. Электрон-дырочные пары, фотогенерированные в поглощающем слое $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ (ширина запрещённой зоны $E_g \sim 0,75$ эВ при комнатной температуре), разделяются под действием электрического поля. Дырки дрейфуют в область лавинного умножения широкозонного InP (ширина запрещённой зоны $E_g \sim 1,35$ эВ при комнатной температуре), где при достижении электрического поля около 450 кВ/см, подобно триггеру, возникает импульс лавинного тока. Между поглощающим слоем и областью умножения располагается зарядный слой, предназначенный для формирования сильного электрического поля в области лавинного умножения и слабого электрического поля в поглощающем слое. Слой градиентного состава InGaAlAs предназначен для уменьшения эффекта захвата дырок, связанных с разрывом валентной зоны на 0,6 эВ.

Диффузионное распределение p -области в верхнем i -слое InP специальной формы на глубину около 2 мкм позволяет, во-первых, предотвратить возникновение ло-

кального преждевременного электрического пробоя (краевые геометрические эффекты $p-n$ -перехода) и, во-вторых, локализовать область сильного электрического поля. Для формирования такого профиля p -области в данной конструкции используется диффузионное легирование цинком с предварительно вытравленным InP на глубину 0,5 мкм через окна в диэлектрике. Для минимизации поверхностных утечек рабочие области ОЛФД окружаются охранными кольцами.

При выборе толщины поглощающего слоя необходим оптимум между величиной приемлемой квантовой эффективности и быстродействием, определяемым временем пролёта. Для регистрации одиночных фотонов оптимальным является диапазон толщин поглощающего слоя InGaAs 1–2 мкм, при этом поглощение составляет более 75 %. Уровень легирования в области поглощения должен быть минимален. Фоновое значение концентрации определяется возможностями метода молекулярно-лучевой эпитаксии и находится в диапазоне $(0,5-1) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для обеспечения высокого быстродействия ОЛФД электрическое поле в поглощающем слое InGaAs должно быть не менее 10 кВ/см, но не более 100 кВ/см из-за вероятности возникновения большого туннельного тока.

Важным параметром, определяющим характеристики ОЛФД, является толщина области лавинного умножения (t_M). Моделирование, проведённое в [12–14], показало, что напряжение пробоя линейно зависит от толщины области лавинного умножения. При значениях t_M , равных 0,5, 1,5, 2,5 и 3 мкм, пробивное напряжение составляло 48, 88, 125 и 144 В соответственно. Основными механизмами, определяющими обратный темновой ток и соответственно темновую частоту импульсов DCR, являются:

- 1) тепловая генерация в поглощающем слое InGaAs;
- 2) туннельный ток из ловушек в слое лавинного умножения.

Током, связанным с тепловой генерацией, можно пренебречь при температуре ниже 200 К. При этом увеличение толщины области лавинного умножения приводит к минимальному значению частоты DCR и максимальному пробивному напряжению. Однако при низкой температуре снижается скорость счёта (из-за эффекта послепульсаций). Поэтому необходим компромисс между минимальной величиной DCR и скоростью счёта. Оптимальная толщина слоя лавинного умножения, определяющая вероятность туннельной генерации из ловушек и однородность электрического поля, должна быть около 1 мкм при уровне легирования менее $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Роль слоя заряда состоит в управлении профилем электрического поля по всему прибору. Уровень его легирования и толщина определяются таким образом, чтобы обеспечить полное обеднение слоя поглощения InGaAs (так называемый «прокол»), позволяя фотогенерированным носителям дрейфовать в область умножения и детектироваться. Оптимальная толщина зарядного слоя n -InP составляет 150–250 нм при концентрации 10^{17} см^{-3} , что соответствует напряжению пробоя 65–45 В. При этом DCR также будет минимальной, если толщина зарядного слоя попадает в этот диапазон.

Выращивание гетероструктур InP/InGaAs/InP методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) обеспечивает предельно высокое качество как самих плёнок, так и границ раздела между ними; тем самым удовлетворяя самым высоким требованиям, предъявляемым к совершенным гетероструктурам.

В данной работе гетероструктуры InP/InGaAs/InP выращивались методом МЛЭ на установке, созданной в ИФП СО РАН. В качестве подложек использовались пластины n -InP(001) диаметром 2 дюйма. Потoki молекул As_2 и P_2 формировались источниками вентильного типа с зоной крекинга. В качестве шихтовых материалов использовался металлический мышьяк и поликристаллический фосфид индия соответственно [15, 16]. Потoki In, Ga, Al и легирующей примеси Si формировались тигельными источниками. Контроль

режимов роста в процессе МЛЭ осуществлялся методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) по методике, описанной в [17].

Необходимым условием получения высокосовершенных гетероструктур InP/InGaAs/InP является точное согласование постоянных решётки слоя поглощения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с материалом подложки InP. Это условие выполняется при $x = 0,53$.

Поскольку коэффициент встраивания атомов группы III при МЛЭ в широких условиях роста равен единице, то состав растущей плёнки твёрдых растворов замещения по группе III определяется плотностью атомарных потоков группы III, падающих на подложку. Для получения значения $x = 0,53$ плотность потока индия должна в 1,13 раза превосходить поток галлия. В настоящее время в технологии МЛЭ используются два метода определения плотности потоков атомов металлов (калибровки источников). Первый способ базируется на измерении скорости роста плёнки по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса картины ДБЭО (ДБЭО-осцилляции), а второй — на расчёте плотности атомарного потока по измерениям ионного тока электронного манометрического преобразователя (ЭМП), введённого на позицию подложки.

Для реализации первого способа необходимо использовать калибровочные подложки, так как проводить измерения на рабочей подложке не всегда допустимо. Дополнительные трудности возникают, если необходимо провести калибровку источников с разными материалами. В нашем случае это источники In, Ga и Al. Второй способ лишён этого недостатка, но требует проведения калибровки ЭМП, которая заключается в приведении в соответствие ионного тока преобразователя и плотности потока веществ, измеренной каким-либо иным способом. В работе для определения плотности потоков атомов In, Ga и Al был использован ЭМП ПМИ-27. Для калибровки ЭМП нами применялась методика измерения скорости роста по ДБЭО-осцилляциям. В качестве подложек, на которых проводились измерения скорости роста, использовались пластины InAs и GaAs с ориентацией (001).

Ключевым параметром, которым определяется величина темнового тока вблизи напряжения пробоя в ОЛФД, является уровень концентрации фоновых примесей и глубоких центров в поглощающем слое InGaAs и слое лавинного умножения InP полупроводниковой гетероструктуры. В свою очередь, уровень фоновых примесей и глубоких центров в эпитаксиальных слоях зависит от вакуумных условий в зоне роста, чистоты используемых шихтовых материалов и выбора условий роста слоёв. Первые два условия являются базовыми. Поэтому процесс эпитаксии проводится в условиях сверхвысокого вакуума ($\leq 10^{-10}$ Торр) и из шихтовых материалов класса не хуже 7N (99,99999 % основного вещества). Выбор условий роста слоёв (температура роста, величина и отношение молекулярных потоков элементов групп III и V) влияет на встраивание фоновых примесей и образование точечных дефектов (которые в большинстве случаев являются глубокими уровнями) в эпитаксиальных слоях. При этом влияние может быть противоположным для примесей и дефектов различной природы. Задача оптимизации условий роста сводится к выбору значений параметров роста, обеспечивающему получение эпитаксиальных слоёв $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ и InP с минимальной фоновой концентрацией электрически активных примесей и глубоких уровней. С этой целью были проведены исследования влияния температуры роста, величины и отношения молекулярных потоков элементов групп III и V на свойства выращенных намеренно нелегированных слоёв $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ и InP. В результате оптимизации были найдены параметры роста, при которых получены слои *n*-типа $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с концентрацией $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и слои *n*-типа InP с концентрацией $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Изготовление чипа методами планарной технологии. Чипы ОЛФД изготавливались методом планарной технологии. Требуемый профиль легирования *p*-области прибора в верхнем *i*-слое InP формировался в однократном диффузионном процессе цинка через маску из двуокиси кремния за счёт создания на поверхности InP ямки с заданными

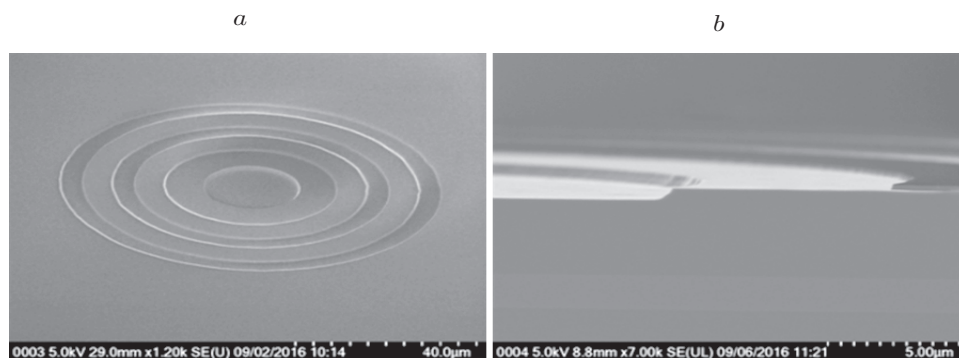


Рис. 2. Изображение в сканирующем электронном микроскопе чипа ОЛФД: общий вид поверхности после формирования ямки в InP глубиной 0,5 мкм и окон в SiO₂ толщиной 0,3 мкм для охранных колец (a) и скол этой структуры (b)

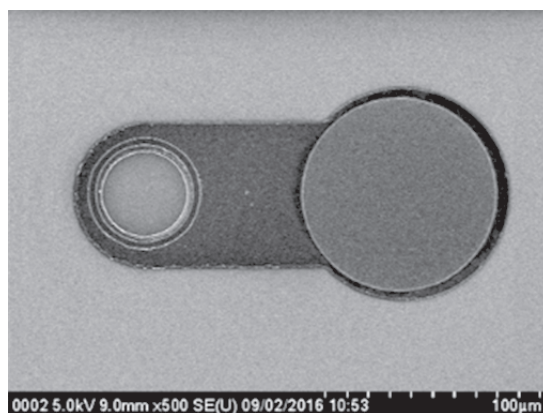


Рис. 3. Внешний вид чипа ОЛФД с диаметром фотоактивной области 20 мкм

глубиной и формой. Ямки изготавливались сухим плазмохимическим травлением в среде BCl_3 , которое обеспечивает формирование круглых ямок требуемого профиля с плоским дном и размерами, задаваемыми шаблоном, без ухудшения морфологии поверхности дна ямки (рис. 2, b). Легирование охранных колец диода выполнялось одновременно с легированием светочувствительной области через окна в двуокиси кремния (рис. 2, a). Был предложен оригинальный метод формирования локальных $p-n$ -переходов в гетероструктурах $i\text{-InP}/i\text{-InGaAs}/n^+\text{-InP}$ с использованием планарных источников Zn на основе тонких плёнок Zn_3P_2 , выращенных на подложках кремния [18, 19]. Контроль профиля легирования p -областей осуществлялся *ex-situ* методом сканирующей электронной микроскопии на сколах.

Для межслоевой изоляции, пассивации поверхности, просветляющего покрытия и маски под легирование использовались слои двуокиси кремния, синтезируемые методом осаждения из газовой фазы низкого давления при температуре 190 °С.

Омические контакты к p -области формировались методом обратной литографии с термическим напылением многослойной композиции $\text{Ti}(10 \text{ нм})/\text{Zn}(20 \text{ нм})/\text{Au}(200 \text{ нм})$ с последующим вжиганием при температуре 370 °С в аргоне в течение 60 с. Тыльный контакт к $n^+\text{-InP}$ формировался путём термического напыления на обратную сторону подложки многослойной металлизации $\text{Ge}(20 \text{ нм})/\text{Au}(20 \text{ нм})/\text{Ni}(20 \text{ нм})/\text{Au}(200 \text{ нм})$ с последующим вжиганием в аргоне при температуре 285 °С в течение 5 мин. Внешний вид ОЛФД представлен на рис. 3.

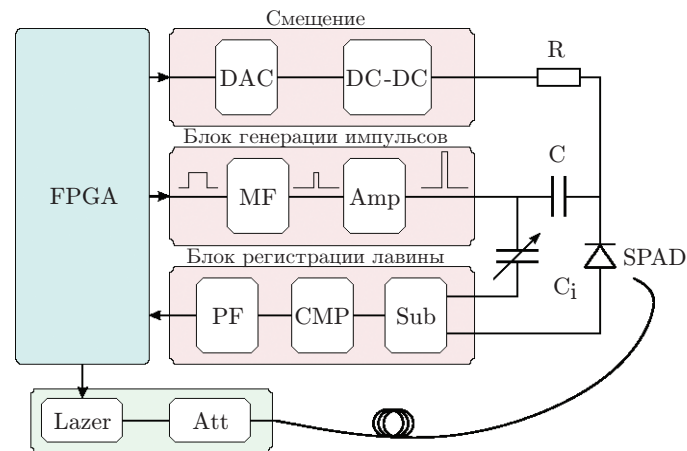


Рис. 4. Блок-схема модуля счёта фотонов для характеристики ОЛФД (MF — одновибратор, Amp — каскад усилителей на ОУ)

Методика исследования. Для определения основных параметров ОЛФД (частоты темнового счёта DCR, квантовой эффективности счёта, вероятности послепульсаций и др.) был создан модуль счёта фотонов, работающий в стробируемом режиме. На рис. 4 представлена блок-схема модуля, состоящая из ОЛФД (single photon avalanche diode, SPAD), блока генерации напряжения смещения (Bias), блока регистрации лавины (Avalanche registration block), блока генерации строга (Gate generation block), а также управляющего контроллера, реализованного на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) (field-programmable gate array, FPGA). В качестве источника одиночных фотонов используется коммерческий лазерный диод с длиной волны 1550 нм (Laser). Лазерное излучение ослабляется до однофотонного уровня с помощью управляемого аттенюатора FVOA-2000 (Att).

Блок генерации напряжения смещения обеспечивает напряжение на SPAD ниже напряжения пробоя V_b и состоит из регулируемого повышающего импульсного преобразователя напряжения (DC-DC), управляемого цифро-аналоговым преобразователем (DAC).

Блок генерации строга по сигналу с ПЛИС формирует короткий (1,2 нс) импульс амплитудой 6 В. Этот импульс, проходя через разделительный конденсатор C и складываясь с напряжением, сформированным блоком Bias, обеспечивает на SPAD напряжение выше пробивного и соответственно гейгеровский режим работы.

Для компенсации ёмкостного зарядного тока, проходящего через SPAD, стробирующий импульс, через имитирующую ёмкость C_i подаётся на вычитатель (Sub) вместе с сигналом со SPAD. Далее сигнал дискриминируется по амплитуде с помощью компаратора CMP, и в случае достаточной амплитуды запускает формирователь PF, генерирующий одиночный Low-Voltage TTL (LVTTTL) импульс, передающийся на ПЛИС, который, в свою очередь, считывает количество срабатываний и сохраняет его в 21-битном регистре. Частота следования импульсов определяется настройками управляющего контроллера на основе FPGA Xilinx XC6SLX9 серии SPARTAN-6 и может варьироваться от 0,1 до 100 МГц. Запуск генерации стробов, настройка контроллера и считывание результатов производится с помощью компьютера по протоколу UART.

Результаты и обсуждение. На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) образца ОЛФД, измеренные при различных температурах. Кроме того, была измерена световая ВАХ этого же образца при включении непрерывной ИК-засветки от лазера с мощностью 5 нВт для температуры 219 К. Из световой ВАХ образца видно, что включение ИК-засветки приводит к увеличению измеряемого обратного тока более чем

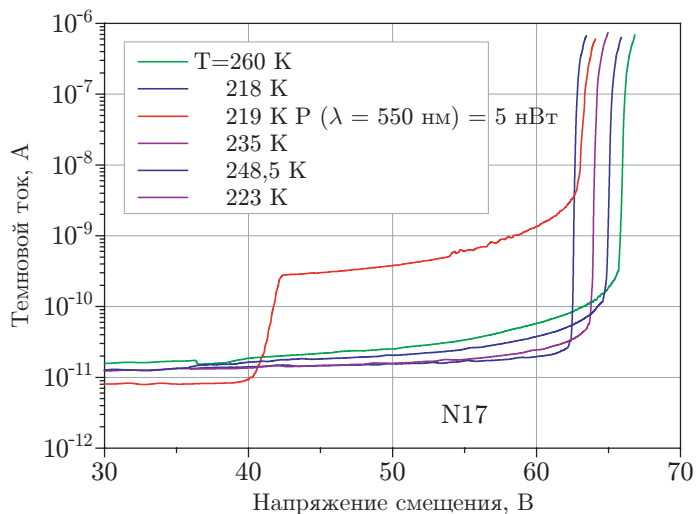


Рис. 5. Темновые вольт-амперные характеристики образца ОЛФД при различных температурах и при ИК-засветке

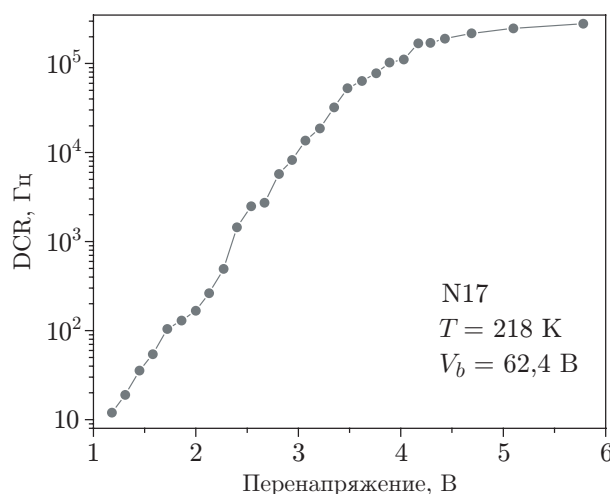


Рис. 6. Зависимость частоты темного счёта образца ОЛФД от перенапряжения

на порядок. По мере увеличения приложенного внешнего напряжения в ОЛФД происходит расширение области обеднения (пространственного заряда ОПЗ) в слое лавинного умножения InP и далее в поглощающем слое InGaAs до полного смыкания с контактным буферным слоем InP. Для образца включение ИК-засветки приводит к появлению фототока, который возникает ступенчато при достижении обратного напряжения 42,3 В, при котором ОПЗ достигает узкозонного слоя InGaAs. Когда ОЛФД полностью обеднён, дальнейшее увеличение напряжения приводит к возрастанию электрического поля в слое лавинного умножения до величины напряжения лавинного пробоя $V_b = 62,4$ В. Значение темнового тока при рабочей температуре 218 К вблизи V_b составляет $2,5 \cdot 10^{-11}$ А.

На рис. 6 приведена зависимость темновой частоты счёта от величины перенапряжения V_b . Видно, что в диапазоне перенапряжения от 1 до 3,5 В DCR имеет величину менее 50 кГц.

Таким образом, достигнутые параметры разработанного образца ОЛФД не уступают зарубежным аналогам.

Заключение. В рамках данной работы были сконструированы, изготовлены и исследованы опытные образцы однофотонных лавинных фотодиодов на основе полупроводниковых гетероструктур InP/InGaAs/InP, предназначенных для использования в оптоволоконных квантовых системах связи. Проведены предварительные измерения параметров макета ОЛФД–ВАХ при комнатной (295 К) и рабочей температурах (215–220 К) в темноте и при засветке. Определены значения напряжения пробоя (62 В) и темнового тока $2,5 \cdot 10^{-11}$ А вблизи напряжения пробоя при рабочей температуре 219 К.

При измерениях в импульсном гейгеровском режиме была получена частота темновых импульсов менее 50 кГц при перенапряжении до 3,5 В. Достигнутые параметры близки к параметрам зарубежных аналогов, что свидетельствует о возможности применения разработанных ОЛФД в системах однофотонной квантовой связи.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (грант № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wooters W. K., Zurek W. H.** A single quantum cannot be cloned // *Nature*. 1982. **299**. P. 802–803.
2. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.** Quantum cryptography // *Rev. Mod. Phys.* 2002. **74**, Iss. 1. P. 145–175.
3. **Рябцев И. И., Бетеров И. И., Третьяков Д. Б. и др.** Экспериментальная квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами // *Вестн. РАН*. 2013. **83**, № 7. С. 606–615.
4. **Рябцев И. И., Третьяков Д. Б., Коляко А. В. и др.** Элементная база квантовой информатики II: квантовые коммуникации с одиночными фотонами // *Микроэлектроника*. 2017. **46**, № 2. С. 131–141.
5. **ID Quantique (IDQ)**. 2021. URL: <http://www.idquantique.com> (дата обращения: 04.08.2021).
6. **Gol'tsman G. N., Okunev O., Chulkova G. et al.** Picosecond superconducting single-photon optical detector // *Appl. Phys. Lett.* 2001. **79**, Iss. 6. P. 705–707.
7. **WOORIRO Co., Ltd.** URL: <http://www.wooriro.com> (дата обращения: 04.08.2021).
8. **Liu Y., Forrest S. R., Lange M. J. et al.** A planar InP/InGaAs avalanche photodiode with floating guard ring and double diffused junction // *Journ. Lightwave Technol.* 1992. **10**, Iss. 2. P. 182–193.
9. **Pellegrini S.** InGaAs/InP single-photon avalanche diodes // Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. Edinburgh: Heriot-Watt University, 2005. 156 p.
10. **Itzler M. A., Jiang X., Entwistle M. et al.** Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors // *Journ. Modern Opt.* 2011. **58**, N 3–4. P. 174–200.
11. **Ma J., Bai B., Wang L. et al.** Design considerations of high-performance InP/InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for quantum key distribution // *Appl. Opt.* 2016. **55**, Iss. 27. P. 7497–7502.
12. **Comandar L., Frohlich B., Dynes J. et al.** Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55 % at 1550 nm // *Journ. Appl. Phys.* 2015. **117**, Iss. 8. P. 083109-1–083109-5.
13. **Acerbi F., Anti M., Tosi A., Zappa F.** Design criteria for InGaAs/InP single-photon avalanche diode // *IEEE Photon. Journ.* 2013. **5**, N 2. P. 6800209.
14. **Lee K., Yang K.** Analysis of InGaAs/InP single-photon avalanche diodes with the multiplication width variation // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2014. **26**, Iss. 10. P. 999–1002.

15. **Putyato M. A., Volkhovityanov Yu. V., Chikichev S. I. et al.** InP decomposition phosphorus beam source for MBE: Design, properties and superlattice growth // *Semicond. Sci. Technol.* 2003. **18**, Iss. 6. P. 417–422.
16. **Putyato M. A., Preobrazhenskii V. V., Semyagin B. R. et al.** InGaAsP/InGaP superlattices by conventional MBE with molten metal solution phosphorus source // *Journ. Cryst. Growth.* 2003. **247**, Iss. 1–2. P. 23–27.
17. **Преображенский В. В., Путято М. А., Семягин Б. Р.** Контроль параметров процесса молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs при низких температурах роста // *ФТП.* 2002. **36**, № 8. С. 897–901.
18. **Пат. 2686523 РФ.** Способ легирования цинком подложек или слоёв фосфида индия /М. О. Петрушков, М. А. Путято, Е. А. Емельянов, В. В. Преображенский, Б. Р. Семягин, Д. Ф. Феклин, А. В. Васев. Опубл. 29.04.2019; Бюл. № 13.
19. **Петрушков М. О., Путято М. А., Чистохин И. Б. и др.** Метод диффузии цинка в InP через узкий зазор с использованием планарного источника на основе Zn_3P_2 // *Письма в ЖТФ.* 2018. **44**, № 14. С. 19–25.

Поступила в редакцию 04.08.2021

После доработки 11.08.2021

Принята к публикации 16.08.2021
