

ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА

Измерительный стенд для однофотонных детекторов на основе наноструктур NbN

К. А. Балыгин,^{1,2} С. И. Божко,³ А. М. Ионов,³ А. И. Климов,^{1,2, a}
С. П. Кулик,^{2,4} С. Н. Молотков,^{2,3} И. Е. Осташев,¹ В. М. Черняк³

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

² Центр квантовых технологий МГУ имени М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

³ Институт физики твердого тела ИФТТ РАН.

Россия, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Ю. А. Осипьяна, д. 2.

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 09.12.2019, после доработки 11.03.2020, принята к публикации 11.03.2020.

Представлен измерительный комплекс для регистрации событий однофотонными сверхпроводниковыми детекторами на основе NbN-структур, в котором в качестве криогенных усилителей используются малошумящие, высокочастотные НЕМТ-транзисторы.

Ключевые слова: криогенный усилитель, однофотонный детектор, криостат.

УДК: 533.9.082. PACS: 42.50.Ех.

ВВЕДЕНИЕ

Стенд для исследования и оптимизации параметров однофотонных детекторов для систем квантовой криптографии, включая сверхпроводниковые однофотонные детекторы, должен обеспечивать:

- возможность экспериментальной оценки квантовой эффективности однофотонных детекторов;
- возможность экспериментального измерения частоты темновых отсчетов однофотонных детекторов в диапазоне 10^{-3} – 10^{-7} нс⁻¹;
- возможность экспериментального тестирования однофотонных детекторов в оптическом диапазоне длин волн.

Первыми однофотонными детекторами были широко известные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Механизм регистрации фотонов в этих устройствах основан на внешнем фотоэффекте (выбивании электронов из фотокатода при поглощении фотона) и последующем размножении лавины.

Следующим детектором фотонов можно считать детектор на основе микроканальных пластин (МКП). МКП содержит $\sim 10^6$ каналов на квадратный сантиметр, каждый из которых действует как независимый электронный умножитель. Канал МКП представляет собой тонкую стеклянную трубку с электродами на концах, поверхность которой обладает высоким сопротивлением и коэффициентом вторичной эмиссии. Под действием электрического поля, приложенного к концам трубки, в ней происходит процесс электронного умножения до тех пор, пока электронная лавина не достигнет конца трубки [1].

Для однофотонного детектирования на длинах волн, превышающих 1000 нм, изготавливаются лавинные фотодиоды на основе полупроводников Ge, InGaAs с малой шириной запрещенной зоны. Максимальное значение квантовой эффективности таких

детекторов не превышает $\sim 20\%$ на длине волны 1500 нм, недостатком является довольно большой темновой счет $\sim 10^4$ 1/с. Более подробно различные типы полупроводниковых детекторов однофотонных событий рассмотрены в работе [2].

Детектор на основе наноструктуры из ультратонкой пленки нитрида ниобия (NbN), известный как сверхпроводниковый однофотонный детектор (*Superconducting Single Photon Detector — SSPD*), чувствителен к одиночным фотонам в видимом и инфракрасном диапазонах и, наряду с малыми уровнями шума, обладает временами восстановления и точностью измерений лучшими, чем существующие однофотонные детекторы на основе кремния (Si) и InGaAs [3].

Для развития квантовой оптики и ее практического применения требуются однофотонные детекторы, обладающие высокой квантовой эффективностью (близкой к 100%), малой скоростью темновых отсчетов ($\sim 1/с$), высокой скоростью счета фотонов и пикосекундным временным разрешением. В работе [3] описан механизм детектирования фотона в сверхпроводящей пленке.

Единый фотон, поглощенный в сверхпроводящей полоске пленки, создает область нормального металла, что вызывает перераспределение течения тока и, следовательно, увеличивает плотности тока в сверхпроводящих областях. Когда плотность тока превышает критическое значение, пленка переключается в резистивное состояние и между концами полоски генерирует импульс напряжения. В наиболее распространенных однофотонных сверхпроводящих датчиках на базе тонких пленок NbN величина импульса напряжения не превышает милливольт, а типичное время нарастания напряжения находится в наносекундном диапазоне [4]. Сверхпроводящие датчики эксплуатируются при температурах жидкого гелия, и регистрация слабого, высокочастотного импульса является сложной технической задачей.

^a E-mail: nrc.klimov@gmail.com

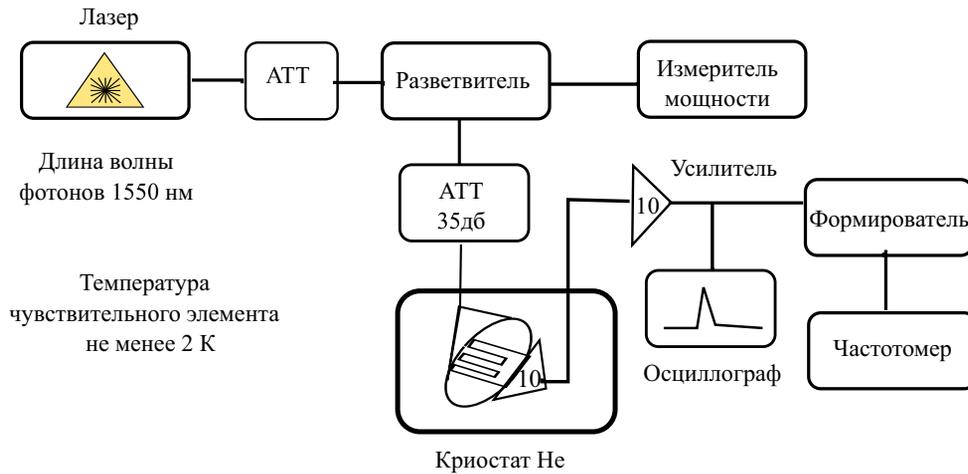


Рис. 1. Функциональная схема измерительного стенда

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе представлены результаты по разработке измерительного стенда для тестирования высокочувствительных и быстродействующих детекторов одиночных фотонов на базе тонкопленочных структур NbN, работающих в инфракрасном диапазоне. Для обеспечения оптимального режима работы сверхпроводящих однофотонных детекторов и определения их основных характеристик используется измерительный комплекс, состоящий из гелиевого криостата с криогенной вставкой, лазерного источника излучения, устройства питания, обеспечивающего установку необходимого тока с измерением напряжения и регистрирующей аппаратуры для обработки сигналов детекторов (рис. 1).

Как было отмечено ранее, при регистрации фотона в тонкопленочном NbN-детекторе амплитуда выходного импульса составляет ~ 1 мВ с длительностью переднего фронта ≤ 1 нс. Поэтому одной из основных задач, решенных в рамках создания испытательного стенда, была разработка криогенного усилителя, расположенного в непосредственной близости к сверхпроводящему сенсору детектора.

На рис. 2 представлена схема криостата с исследуемым образцом. Сборка сверхпроводящего NbN-детектора и криогенного усилителя соединялась через высокочастотный разъем SMA с полужестким кабелем UT 141B-SS фирмы MICRO-COAX (USA).

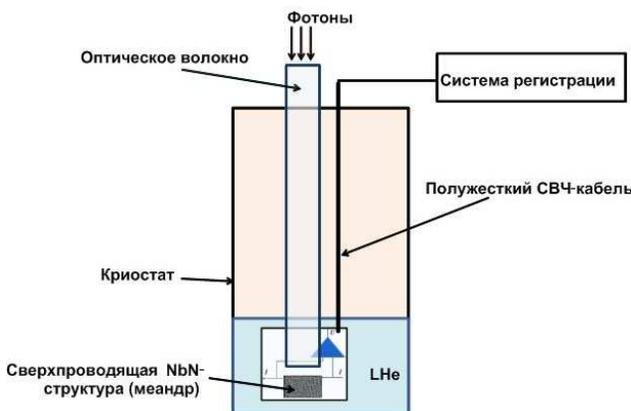


Рис. 2. Схема криостата с исследуемым образцом

Внешний экран кабеля выполнен из нержавеющей стали, центральный проводник — из бериллиевой бронзы с соединителями типа SMA фирмы Rosenberger (Германия). Выбор кабеля продиктован условием минимизации тепловых потерь при передаче сигнала детектора из зоны жидкого гелия (~ 4 К) в условия комнатных температур. Малошумящие криогенные усилители, реализованные на печатной плате с использованием высокочастотных НЕМТ- (*High Electron Mobility Transistor*) транзисторов [5, 6] содержат цепи смещения SSPD-детектора, фильтры питания и размещаются в криостате в среде жидкого гелия. НЕМТ — полевой транзистор с высокой подвижностью электронов, в котором для создания канала вместо легированной области, в отличие от обычных МОП-транзисторов, используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны (т.н. гетеропереход). Область применения НЕМТ полевых транзисторов — связь в микроволновом и миллиметровом диапазонах длин волн, радиоастрономия и радары — то есть любые устройства, в которых требуется высокая степень усиления сигнала и низкий шум на больших частотах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Принципиальная схема двухкаскадного криогенного усилителя представлена на рис. 3. Криогенный усилитель, выполненный на НЕМТ-транзисторах, является двухкаскадным усилителем с емкостными связями. Он изготовлен на двухслойной печатной плате с использованием малогабаритных резисторов, конденсаторов и многослойных индуктивностей. Для уменьшения паразитных реактивностей шина «земля» пронизана сквозными металлизированными отверстиями, коэффициент передачи двухкаскадного усилителя составляет $K = 24$ дБ. Подбором величины шунтирующего NbN структуру резистора R2 можно подобрать оптимальный режим работы детектора. После поглощения фотона сверхпроводимость полностью восстанавливается. Это происходит благодаря тому, что горячее пятно «остывает», так как ток начинает течь по шунтирующему сопротивлению и сопротивление сверхпроводящей пленки обращается в ноль. Ток через пленку экспоненциально

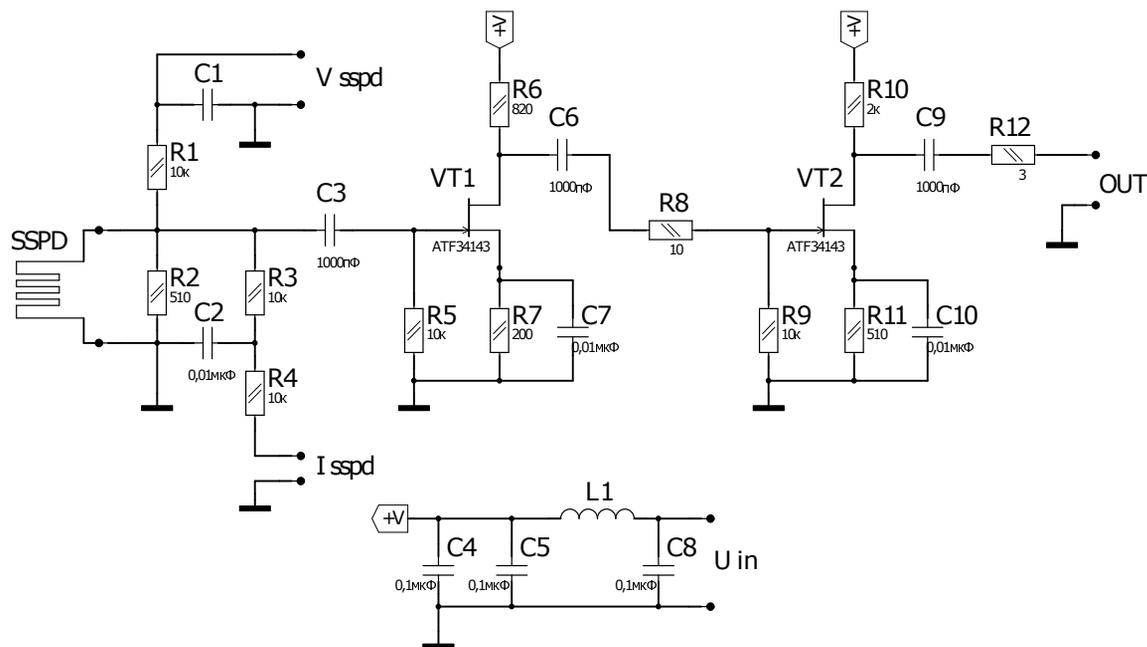
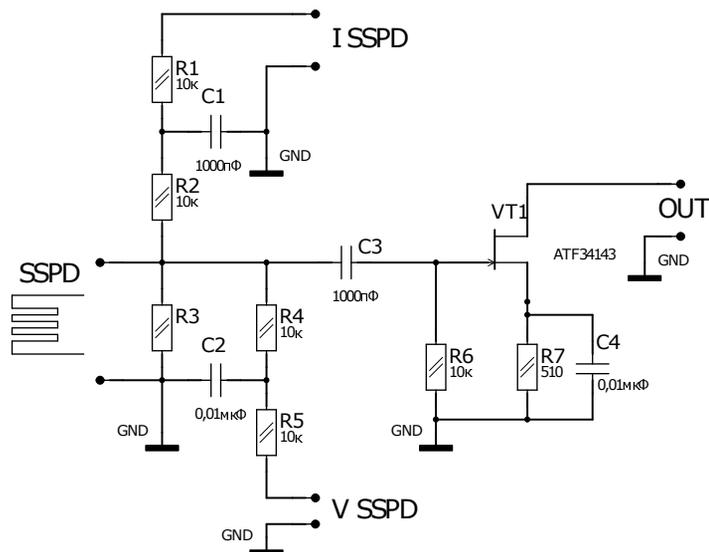
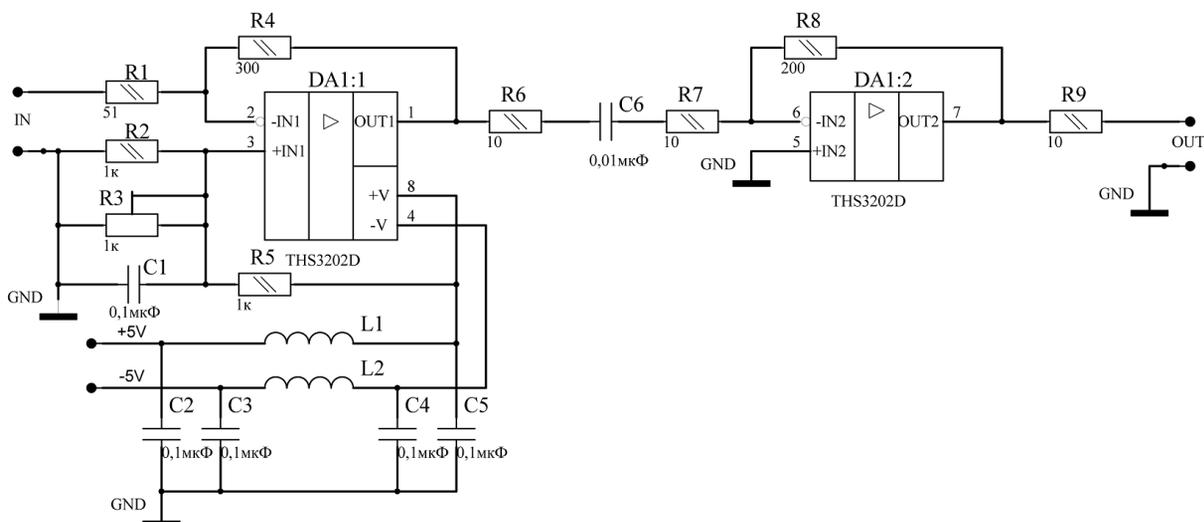


Рис. 3. Принципиальная схема двухкаскадного криогенного усилителя



a



b

Рис. 4. a – Принципиальная схема однокаскадного криогенного усилителя, б – составная часть однокаскадного усилителя, работающая в условиях комнатной температуры

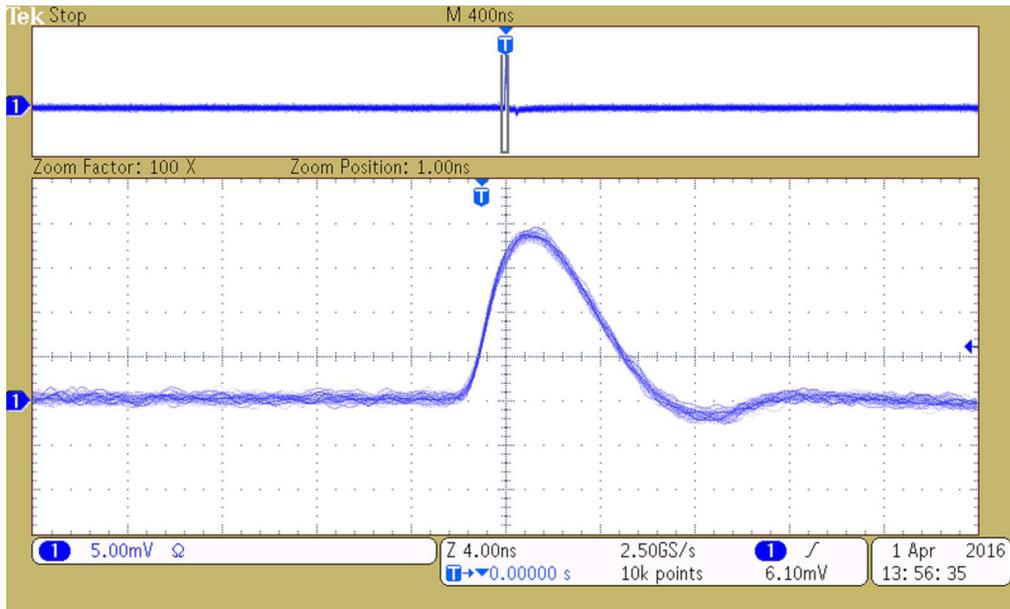


Рис. 5. Осциллограмма выходного сигнала криогенного усилителя (2 каскада на НЕМТ-транзисторах ATF-34143) при срабатывании SSPD-детектора ($T = 4.2$ K, $\lambda = 1550$ нм). $T_{\phi} \sim 1.6$ нс, $T_{\text{сн}} \sim 5$ нс, $K_y = 24$ дБ

возвращается к своему начальному значению до поглощения фотона с постоянной времени $\tau = L_K/R$, (L_K — кинетическая индуктивность детектора). Максимальная скорость счета определяется величиной, обратной полному времени восстановления $(3\tau)^{-1}$. Время восстановления может быть уменьшено с помощью увеличения R2 или уменьшения L_K . Если τ слишком мало, детектор не восстановится до исходного состояния, а останется в состоянии с фиксированным напряжением, в котором он нечувствителен к (падающим) регистрируемым фотонам (возникнет так называемое «запирание»). В работах [7, 8] показано, что «запирание» происходит, если время восстановления значительно меньше времени охлаждения горячего пятна. Резисторы R7 и R11 в цепях истоков транзисторов VT1 и VT2 устанавливают открытое состояние этих транзисторов, большое значение удельной крутизны характеристики транзистора ($S \geq 200$ мА/В) позволяет получить значительные значения коэффициента усиления по мощности при сохранении временных характеристик входных сигналов.

Учитывая особые условия эксплуатации криогенных усилителей ($T = 4$ K), рассеиваемая мощность на плате не должна превышать 10–20 мВт. Для низкотемпературного режима ($T \leq 2$ K) в случае использования криостата с откачкой паров гелия был разработан однокаскадный усилитель (рис. 4) с подачей питания на плату по ВЧ сигнальному кабелю, мощность рассеивания в этом случае не превышала 5 мВт (рис. 4, а). Каскад усиления на НЕМТ транзисторе VT1, расположенный в среде жидкого гелия обеспечивает оптимальное согласование выходного сопротивления однофотонного детектора с волновым сопротивлением в.ч. кабеля, передающего сигнал SSPD-детектора в зону комнатных температур для последующего усиления. Выбор оптимального напряжения питания транзистора VT1 осуществляется резистором R3 (рис. 4, б) двухкаскадного усилителя, выполненного на операционных усилителях

THS3202 (Texas Instruments). Микросхема содержит два усилителя, охваченные токовой обратной связью, обеспечивающие высокую скорость нарастания выходного сигнала (~ 9 В/нс) с малыми искажениями.

На рис. 5 представлена осциллограмма выходного сигнала криогенного усилителя, соединенного непосредственно с однофотонным сверхпроводящим детектором на основе наноструктуры из ультратонкой пленки нитрида ниобия (NbN). Амплитуда сигнала на выходе усилителя составляет величину ~ 15 –20 мВ, величина «шумовой» дорожки ~ 1 мВ. Учитывая, что коэффициент передачи усилителя равен 24 дБ ($K = 15$), уровень шума, приведенного ко входу усилителя, не превышает 50–70 мкВ.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента усиления двухкаскадного усилителя от частоты. Из рисунка видно, что в диапазоне частот от 50 до 400 МГц коэффициент усиления составляет величину ~ 20 дБ и разброс коэффициента усиления не превышает 3 дБ.

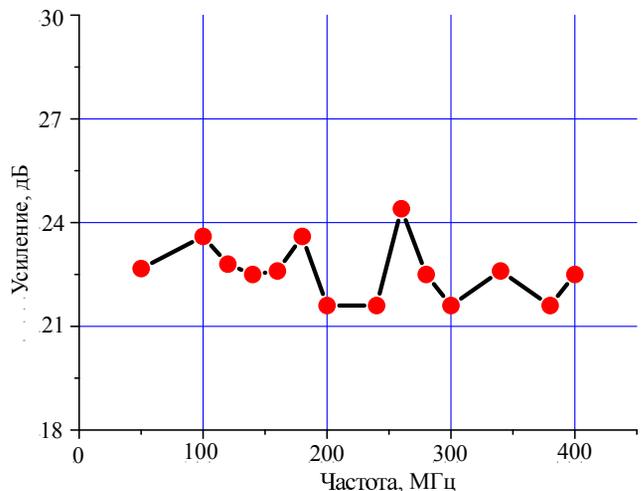


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента усиления двухкаскадного криогенного усилителя

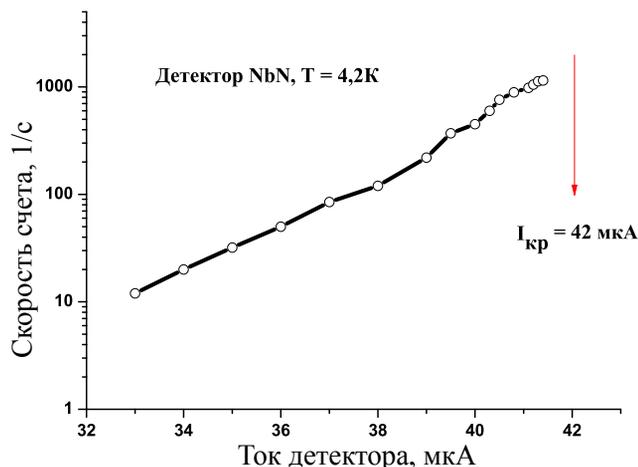


Рис. 7. Зависимость скорости счета от тока детектора при засветке от лазера $W = 50$ нДж, $\lambda = 1550$ нм

На рис. 7 представлена зависимость скорости счета детектора от тока детектора. Из представленного графика видно, что скорость счета и, следовательно, квантовая эффективность детектора значительно увеличиваются при значениях тока детектора, близких к критическому, в то же время частота «темновых» отсчетов сохраняется на уровне единиц в секунду. Исследовалась также зависимость скорости счета сверхпроводникового однофотонного детектора от поляризации лазерного излучения. В некоторых образцах зависимость счета от поляризации довольно высокая $N_{\max}/N_{\min} = 2-3$, в других образцах наблюдается низкая поляризационная чувствительность, $N_{\max}/N_{\min} = 20-30\%$.

При оценке квантовой эффективности регистрации однофотонных сигналов детектором NbN использовалась счетная характеристика детектора, представленная в таблице, $I_{\text{детек.критич}} = 46$ мкА.

Таблица.

$I_{\text{детек}}, \text{ мкА}$	44	44.5	45	45.2
$F_{\text{засв}}, 1/\text{с}$	16000	21000	28000	31000
$F_{\text{темн}}, 1/\text{с}$	0.2	3	8	9

Значение квантовой эффективности регистрации сигналов однофотонным детектором NbN рассчитывается в соответствии формулой

$$Q = \frac{h\nu(f - f_t)\alpha k S}{W_s},$$

где W_s — мощность излучения лазера, в нашем случае — 1.0 мкВт (7.8×10^{12} фотон/с), $h\nu = 1.28 \times 10^{-19}$ Дж — энергия фотона, α — ослабление оптического тракта, зависящий от отношения площади светового пятна на образце и площади детектора, ($k = 2.7 \times 10^7$), f — скорость счета в присутствии лазерного облучения структуры, f_t — скорость темновых отсчетов, S — площадь светового пятна на образце. Эффективная мощность засветки с учетом коэффициента ослабления равна $W_{\text{эфф}} = 7.8 \times 10^{12} / 2.7 \times 10^7 = 2.6 \times 10^5$ фотонов/с. Таким образом, квантовая эффективность сверхпроводникового однофотонного детектора при $I_{\text{детек}} = 45.2$ мкА, $Q_{\text{дет}} = \{(f - f_{\text{тем}}) / W_{\text{эфф}}\} \times 100\%$ равна $Q_{\text{дет}} = \{31000 / 2.6 \times 10^5\} \times 100\% = 11.9\%$.

Криогенный усилитель при рабочей температуре 2 К обладает следующими параметрами:

1. Уровень шума, приведенный ко входу, не более 100 мкВ;
2. Полоса пропускания не менее 300 МГц;
3. Входное сопротивление 50–500 Ом;
4. Потребляемая мощность не более 5 мВт;
5. Коэффициент усиления ~ 14 дБ ($K = 5$).

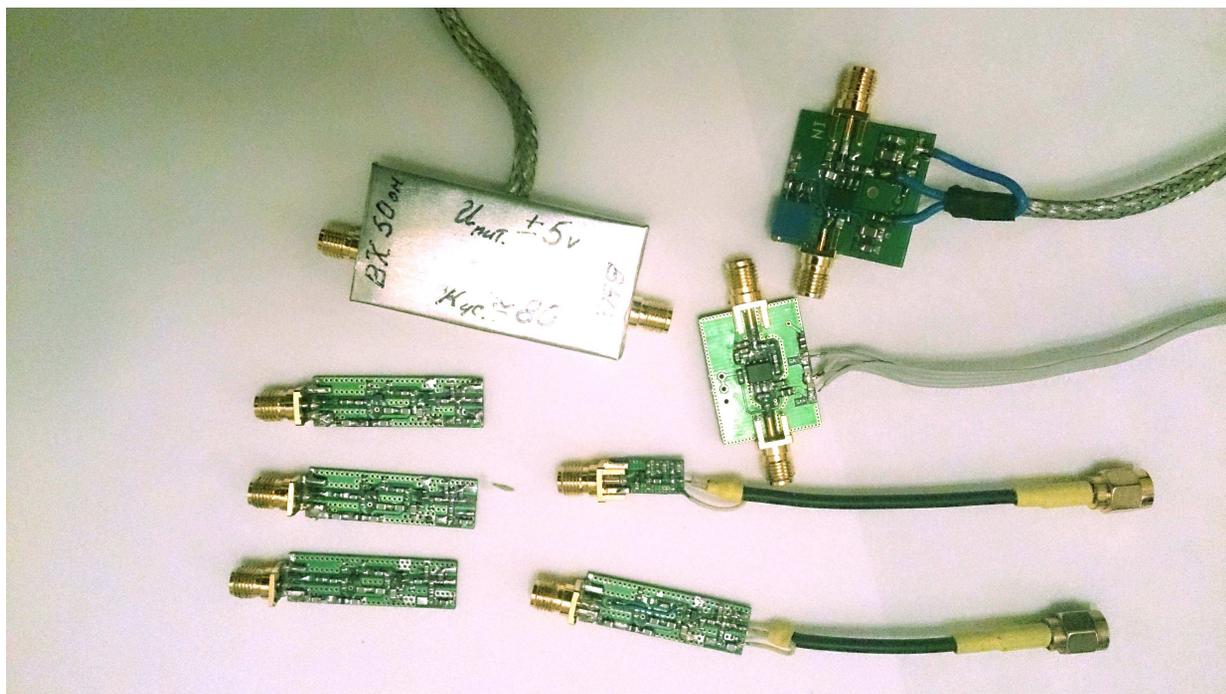


Рис. 8. Образцы усилителей, используемых в качестве регистрирующей аппаратуры измерительного стенда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе создания измерительного стенда для работы с однофотонными сверхпроводниковыми детекторами была изготовлена линейка усилителей сигналов, образцы которых представлены на рис. 8. Разработка и изготовление линейки маломощных криогенных усилителей на основе высокочастотных НЕМТ-транзисторов позволило разместить их в непосредственной близости от однофотонных сенсоров в среде жидкого гелия, тем самым существенно увеличив соотношение сигнал/шум выходных импульсов детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Ю. К., Дражев М. Н., Колпаков И. Ф. и др. Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц. М.: Атомиздат, 1970. С. 44.
2. Корнеева Ю. П. Квантовая эффективность сверхпроводникового однофотонного детектора на основе тонкой пленки NbN. Дисс... канд. физ.-мат. наук, МПГУ, Москва, 2014 г.
3. Semenov A. D., Goldtsman G. N., Korneev A. A. // Physica C. 2001. **351**. P. 349.
4. Gol'tsman N., Okunev O., Chulkova G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. **79**. P. 705.
5. Agilent ATF-54143 Low Noise Enhancement Mode Pseudomorphic HEMT in a Surface Mount Plastic Package. Data Sheet. May 31, 2001.
6. www.avagotech.com
7. Natarajan C. M., Tanner M. G., Hadfield H. // Supercond. Sci. Technol. 2012. **25**. 063001.
8. Annunziata A. J., Quaranta O., Santavica D. F. et al. // J. Appl. Phys. 2010. **108**. 084507.

A Measuring Stand for Single-Photon Detectors Based on NbN Nanostructures

K. A. Balygin^{1,4}, S. I. Bozhko², A. M. Ionov², A. I. Klimov^{1,4,a}, S. P. Kulik^{3,4}, S. N. Molotkov^{2,4}, I. E. Ostashev¹, V. M. Chernyk²

¹National research center «Kurchatov Institute», Moscow 123182, Russia.

²Institute of solid state physics, IFTT RAS. Moscow region, Chernogolovka 142432, Russia.

³Faculty of Physics; ⁴Center for quantum technologies, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^anrc.klimov@gmail.com.

A measuring complex for recording events by single-photon superconducting detectors based on NbN structures is presented; low-noise high-frequency HEMT transistors are used as cryogenic amplifiers in it.

Keywords: cryogenic amplifier, single-photon detector, cryostat.

PACS: 42.50.Ex.

Received 09 December 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 3. Pp. 278–283.

Сведения об авторах

1. Бальгин Кирилл Алексеевич — науч. сотрудник, тел.: (499) 196-90-42, kirill.balygin@gmail.com.
2. Божко Сергей Иванович — канд. физ. мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: bozhko@issp.ac.ru.
3. Ионов Андрей Михайлович — доктор физ. мат. наук, вед. науч. сотрудник.
4. Климов Анатолий Иванович — канд. тех. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 196-90-42, e-mail: nrc.klimov@gmail.com.
5. Кулик Сергей Павлович — доктор физ. мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru.
6. Молотков Сергей Николаевич — доктор физ. мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: sergei.molotkov@gmail.com.
7. Осташев Игорь Евгеньевич — гл. специалист; тел.: (499) 196-90-42.
8. Черняк Владимир Максимович — инженер.