



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ СХЕМ

## ELECTROMAGNETIC SHIELDING OF SUPERCONDUCTING QUANTUM CIRCUITS

Е.И.Малеванная<sup>1,2</sup>, аспирант, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0002-3298-8856), К.М.Моисеев<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, (ORCID: 0000-0002-8753-7737), И.А.Родионов<sup>1,2</sup>, к.т.н., директор, (ORCID: 0000-0002-8931-5142) / [ei\\_malevannaya@bmstu.ru](mailto:ei_malevannaya@bmstu.ru)

*E.I. Malevannaya<sup>1,2</sup>, graduate, Junior Researcher, K.M. Moiseev<sup>2</sup>, Cand. of Sci. (Technical), Associate Professor, I.A. Rodionov<sup>1,2</sup>, Founding Director, Cand. of Sci. (Technical)*

DOI: [10.22184/1993-8578.2021.14.7-8.446.458](https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7-8.446.458)

Получено: 16.11.2021 г.

**В статье приводится обзор используемых в ведущих научных группах систем экранов квантовых схем. Выделены общие требования к построению таких систем и выявлены проблемы, связанные с большим разнообразием материалов и отсутствием методики их разработки.**

**The article provides an overview of the shielding systems of quantum circuits used in leading scientific groups. The general requirements for the construction of such systems are outlined and the problems associated with a wide variety of materials and the absence of the methodology for their development are identified.**

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых перспективных направлений в области квантовых вычислений являются сверхпроводниковые квантовые схемы [1]. На сегодняшний день на сверхпроводниковых квантовых структурах уже удалось достичь квантового пре-восходства – квантовый процессор может решить задачу быстрее самого мощного суперкомпьютера [2]. Для корректной и безошибочной работы квантовых схем требуется соблюдение многих условий: уменьшение наведенного заряда [3], минимизация флюктуаций внешнего магнитного поля [3], обеспечение постоянства тока и напряжения управляющих и считающих импульсов [4] и защита от потока инфракрасного (ИК) излучения [5–8]. Все эти факторы вносят свой вклад в разрушение состояния квантовой системы – процесс декогеренции [3].

Особое место в процессе декогеренции занимает ИК-излучение, попадающее на образец с квантовой схемой: вложенная в чип мощность от попадания ИК-фотонов выше, чем от космического

излучения или фоновой радиации [9]. Падающее излучение разрушает куперовские пары с образованием квазичастиц, которые при туннелировании через джозефсоновский переход вызывают как энергетическую релаксацию, так и дефазировку кубита [4].

Флуктуации внешнего магнитного поля и наведенный заряд вносят неконтролируемые изменения в параметры, входящие в энергетическое описание квантовой системы – Гамильтониан: в джозефсоновскую энергию  $E_J$  и сверхпроводящую разность фаз  $\delta$  [10], а также в частоту кубита  $\omega_{01}$ . Все это приводит к непредсказуемому изменению состояния кубита.

Работа сверхпроводниковых кубитов возможна лишь при температуре значительно более низкой, чем критическая температура сверхпроводника (для алюминия  $T_c = 1,18$  К). Охлаждение кубитов до температур порядка 10 мК реализуется с помощью специального оборудования – криостата растворения [11]. Для уменьшения влияния ИК-излучения и других электромагнитных

<sup>1</sup> НОЦ "Функциональные микро- и наносистемы" МГТУ им. Н.Э.Баумана / FMN Laboratory Bauman Moscow State Technical University.

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана / Bauman Moscow State Technical University.



воздействий на квантовую схему в криостате дополнительно к его кожухам используют экранирование и фильтрацию коаксиальных сигнальных линий [12].

Экранирование представляет собой систему вложенных друг в друга экранов, окружающих держатель образца с квантовым процессором. Системы экранов, используемые ведущими научными группами в области квантовых вычислений, отличаются как по конструкции, так и по применяемым материалам. В данной работе проводится анализ требований к экранам для защиты от ИК-излучения и электромагнитного поля, а также обзор систем экранирования (конструкций и материалов) для выбора экранов сверхпроводниковых квантовых схем.

## ПРИНЦИПЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ

### Защита от ИК-излучения

Среди источников ИК-излучения в криостате выделяют [11]:

- сигнальные коаксиальные СВЧ-линии, передающие тепло от верхних ступеней СВЧ-линиям;
- более теплые ступени криостата;
- пассивные элементы измерительной схемы, рассеивающие электрическую энергию в тепло.

Для защиты от этих источников ИК-фотонов экраны, а в некоторых случаях и крышка держателя образца покрываются изнутри специальными поглощающими ИК-излучение покрытиями [5–8, 12–14], степень поглощения которых может достигать 0,95 в терагерцовом диапазоне

электромагнитного излучения. В качестве поглощающих покрытий применяются промышленно выпускающиеся смолы [5–8, 12–15] (например, Styccast 2850 FT, Marconi LAO, Eccosorb CR-series и др.) отдельно или в сочетании с дополнительными частицами на их поверхности (например, порошок SiC с разным размером частиц, уголь или графитовая пыль).

### Защита от электрических и магнитных полей

Источниками электромагнитного излучения являются как природные источники, так и окружающее оборудование [16]. В целом, экранирование включает в себя не только детали конструкции в виде кожуха, но и электротехнические составляющие, например фильтры [17]. Кожухи препятствуют распространению энергии помех в пространстве, а фильтры – распространению помех по проводам. Наилучший экранирующий эффект достигается совместным использованием этих элементов [18, 19]. При этом важно располагать фильтр на входе в экран, а не внутри [19].

Принцип экранирования от электрического поля заключается в переходе заряда из свободного пространства на экран и ухода его в землю [17]. Поэтому для эффективной защиты от электрического поля экран следует выполнять из хорошо проводящего материала (меди, алюминий) с качественным заземлением – контактное сопротивление с землей должно быть минимальным.

## INTRODUCTION

The superconductor quantum circuits [1] present one of the most promising trends in quantum computing. Nowadays, quantum superiority has already been achieved with the use of superconducting quantum structures – a quantum processor can solve a problem faster than the most powerful modern supercomputer [2]. Many conditions are required for correct and error-free operation of quantum circuits: reduction of the induced charge [3], minimization of the external magnetic field fluctuations [3], ensuring current and voltage constancy of control and readout pulses [4] and

protection against infrared (IR) radiation [5–8]. All these factors contribute to the destruction of the quantum system state, the so called decoherence process [3].

A special place in the decoherence process is occupied by IR radiation hitting the sample with the quantum circuit: the intrinsic power from IR photons hitting the chip is higher than a power from cosmic rays or background radiation [9]. The incident radiation destroys Cooper pairs to form quasiparticles, which, when tunneling through the Josephson transition, cause both energy relaxation and dephasing of the qubit [4].

Fluctuations of the external magnetic field and the induced charge cause uncontrollable changes in the parameters included in the energy description of the quantum system – the Hamiltonian: in the Josephson energy  $E_J$  and the superconducting phase difference  $\delta$  [10], as well as in the qubit frequency  $\omega_{01}$ . This leads to unpredictable changes of the qubit state.

Operation of superconductor qubits is only possible at a temperature significantly lower than the critical superconductor temperature (for aluminium  $T_c = 1.18$  K). Qubits cooling to temperatures of 10 mK



От постоянного и медленно меняющегося (до 1 кГц) магнитного поля используют экраны из ферромагнитных материалов (пермаллоев ( $\mu$ -металла, магнитомягкого сплава) или стальей) с большой относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$ . В таком экране линии магнитной индукции проходят в основном по его стенкам, обладающим малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством. Качество экранирования здесь, в основном, определяется магнитной проницаемостью экрана [17, 20].

Принцип действия экранов от переменного высокочастотного магнитного поля заключается в том, что в экране возбуждается переменная ЭДС, которая создает переменные индукционные вихревые токи (токи Фуко) [21]. Магнитное поле этих токов будет замкнутым: внутри экрана будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – вдоль него. Результирующее поле ослаблено внутри экрана и усилено вне его, то есть происходит вытеснение поля из экрана. Такое экранирование уже зависит от глубины проникновения поля при разной частоте ("скин-эффект") и начинает хорошо работать с частотой выше 1 кГц. Для экранов используются немагнитные и ферромагнитные материалы, которые выбираются исходя из глубины проникновения поля [22]. Среди возможных: медь, алюминий,  $\mu$ -металл, сталь, цинк и др.

Также для переменного электромагнитного поля хорошо защищают сверхпроводники:

is realised with a special equipment – dissolution cryostat [11]. To reduce the influence of IR radiation and other electromagnetic influences on the quantum circuit in the cryostat, shielding and filtering of coaxial signal lines are used in addition to the cryostat covers [12].

Shielding presents a system of nested screens surrounding a sample holder with a quantum processor. Shielding systems used by leading research groups in the field of quantum computing vary both in design and in the materials used. This paper provides an analysis of shielding requirements for protection against IR radiation

and electromagnetic fields and an overview of shielding systems (designs and materials) for selecting screens for superconducting quantum circuits.

### PRINCIPLES OF SHIELDING

Protection against IR radiation

The sources of IR radiation in the cryostat are [11]:

- signal coaxial microwave lines transferring heat from the upper stages to the microwave lines;
- warmer cryostat stages;
- passive elements of the measuring circuit that dissipate electrical energy.

в идеальном проводнике нет переменных электрических и магнитных полей: токи протекают по поверхности, не проникая в глубь металла [19]. Если отверстия и щели в экране отсутствуют, то ВЧ магнитные и электрические поля отсутствуют либо внутри, либо снаружи экрана.

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ СХЕМ

Ниже представлены системы экранирования сверхпроводниковых квантовых схем, которые используют ведущие научные группы в своих измерительных схемах.

#### Princeton University (США)

В схемах экранирования здесь в качестве материала держателя образца с квантовой схемой чаще всего используется медь [12, 23] (рис.1). Перед входом в держатель ставится фильтр на основе Eccosorb CR-110 в сочетании с LPF (Low Pass Filter), стоящим снаружи экранов [12, 23, 24]. После держателя идет экран с поглощающим покрытием либо на основе Eccosorb CR-124 [23, 24], либо с использованием смолы Stycast с частицами SiC [12, 23]. Основой экрана служит медь [12] или алюминий [23, 24], который является еще и сверхпроводящим. Далее в экранировании используется экран из  $\mu$ -металла [12, 23, 24], в некоторых случаях – двойной [12]. Также в части схем в разных местах используется Mylar – алюмизированный лавсан – использующийся в качестве дополнительного отражающего слоя [23, 24].

To protect against IR photons sources, the screens, and in some cases also the sample holder lid, are internally coated with special IR absorbing coatings [5–8, 12–14], whose absorption degree can reach 0.95 in the terahertz range of electromagnetic radiation. Commercially available resins [5–8, 12–15] (e.g. Stycast 2850 FT, Marconi LAO, Eccosorb CR-series, etc.) alone or in combination with additional particles on their surface (e.g. SiC powder of different particle sizes, carbon or graphite dust) are used as absorption coatings.

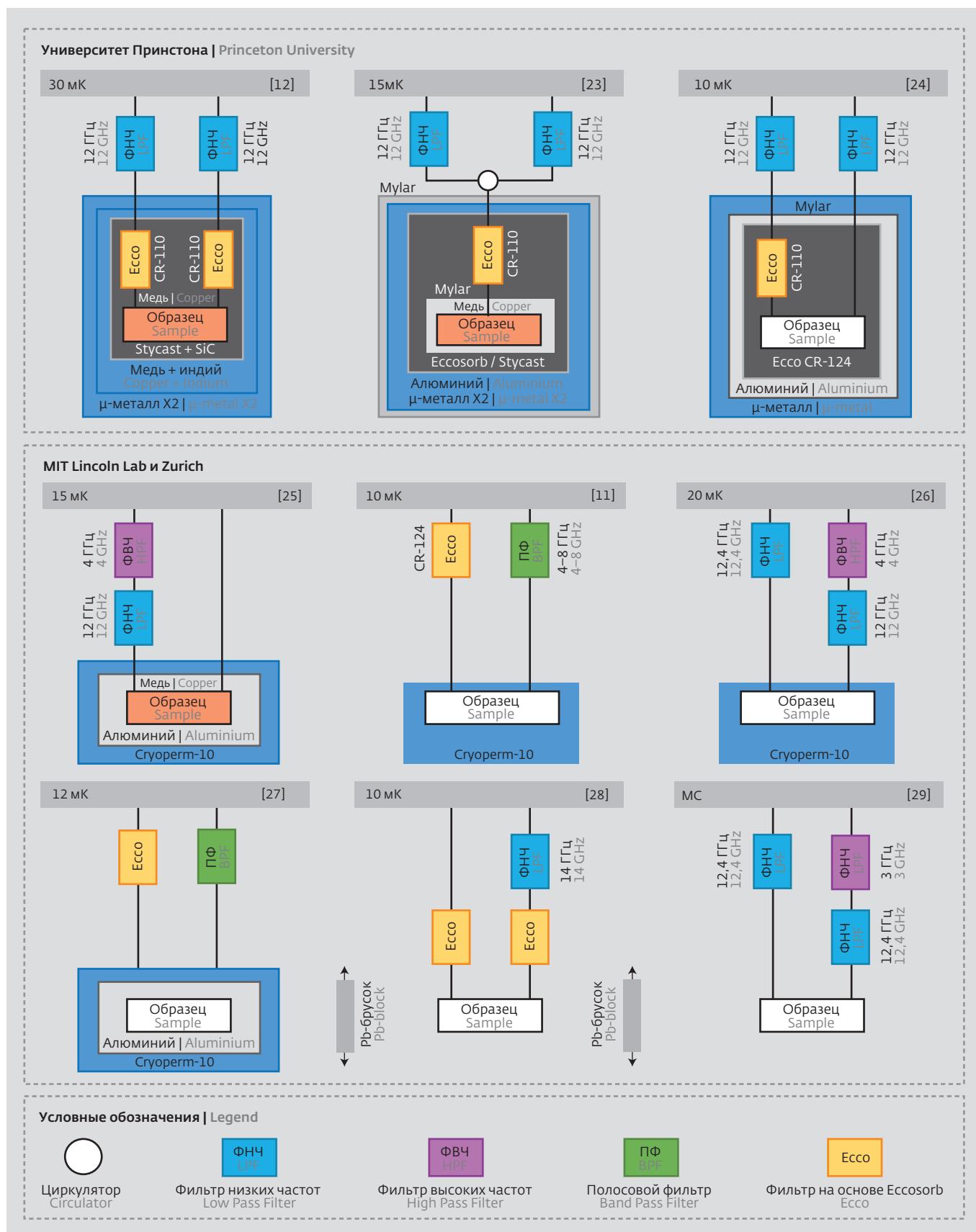


Рис.1. Схемы экранирования в Princeton University, MIT Lincoln Lab и ETH Zurich

Fig.1. Shielding circuits in Princeton University, MIT Lincoln Lab and ETH Zurich

### MIT Lincoln Lab (США), ETH Zurich (Швейцария)

Подход к экранированию в этих двух группах схож (рис.1). Данные по материалам держателя встречаются редко, но на основе работы [25] можно предположить, что предпочтение отдают меди. Далее устанавливаются экраны либо из одного Стюорпера-10 (пермаллои) [11, 26], либо Cryoperm-10 с алюминиевым цилиндром внутри [25, 27]. Для специфической защиты от космического излучения могут применять экранирование из свинцовых брусков [28]. Здесь тоже используются фильтры: на основе Eccosorb CR-110 [27, 28] или Eccosorb CR-124 [11], а также LPF [26, 29] отдельно или в сочетании с HPF (High Pass Filter) [25].

### University of California (UC) Berkeley (США)

Для изготовления держателя используется медь – без покрытия [30] или позолоченная [31], а также алюминий [32] (рис.2). Далее применяется либо простое экранирование Стюорпера [33], либо ступенчатое экранирование: медь с поглощающим материалом [30, 32, 34], алюминиевый цилиндр [32] или фольга [30], Стюорпера [30, 32, 34]. Фильтрация входной линии обеспечивается фильтрами промышленного производства LPF [34–36] и HPF [31] или самостоятельно изготовленными на основе смолы Eccosorb [30] или медного порошка [36].

### Delft University of Technology (Нидерланды)

По материалам держателя данные приводятся не везде, но встречается исполнение держателя из меди, при этом на внутреннюю сторону держателя наносится поглощающее покрытие [37] (рис.2).

Далее применяют многослойное экранирование: алюминиевый экран и два экрана из Стюорпера (разновидность магнитомягкого сплава) [37]. Для фильтрации используют Eccosorb-фильтры [37–39], расположенные вне экранов.

### IBM (США)

Чаще всего данные по материалу держателя не приводятся, однако в работе [40] указано, что держатель изготовлен из алюминия (рис.3). Экранирование представляет собой цилиндр из Ammuneal стюорпера (разновидность магнитомягкого сплава) с покрытием внутри из Eccosorb CR-124 [41, 42]. Также в работе [40] на основе смолы Eccosorb CR-124 была выполнена внешняя оболочка держателя, здесь же экранирование из  $\mu$ -металла применено ко всем ступеням криостата. Часто используют фильтры из Eccosorb [41, 42].

### Google AI Quantum (США)

Держатели, в основном, изготавливают из алюминия [43, 44], в некоторых случаях крышку держателя покрывают поглощающим материалом на основе смолы Styccast с частицами SiC [44] (рис.3). Далее устанавливается экран из  $\mu$ -металла [43, 44]. Также встречается исполнение экранирования в виде индивидуального экрана [2] над образцом с квантовой схемой, на внутреннюю часть такого экрана тоже наносится поглощающее покрытие. Фильтрация линии происходит посредством промышленных LPF и HPF для ИК диапазона [43–45].

### Protection against electric and magnetic fields

Sources of electromagnetic radiation include both natural sources and surrounding equipment [16]. In general, shielding includes not only construction details in the form of enclosures but also electrical components such as filters [17]. Enclosures prevent the propagation of interference energy in space, while filters prevent the propagation of interference through wires. The best shielding effect is achieved by using these components together [18, 19]. It is important to insert the filter at the inlet to the shield, but not inside it [19].

The principle of shielding from an electric field is to transfer the charge from the open space to the shield and to divert it into the ground [17]. Therefore, for effective protection against the electric field, the screen must be made of a highly conductive material (copper, aluminium) with a good ground connection – the contact resistance with the ground must be as low as possible.

The shields made of ferromagnetic materials (permalloys ( $\mu$ -metal, soft magnetic alloy) or steels) with high relative magnetic permeability  $\mu_r$  are used against constant and slowly changing (up

to 1 kHz) magnetic fields. In such a shield, the magnetic induction lines run mainly along its walls, which have a low magnetic resistance compared to the air space. The shielding quality here is mainly determined by the magnetic permeability of the screen [17, 20].

The operating principle of screens against an alternating high-frequency magnetic field is that an alternating EMF is excited in the screen, which creates alternating induction eddy currents (Foucault currents) [21]. The magnetic field of these currents will be closed: inside the screen they will be directed towards the excitation field, and

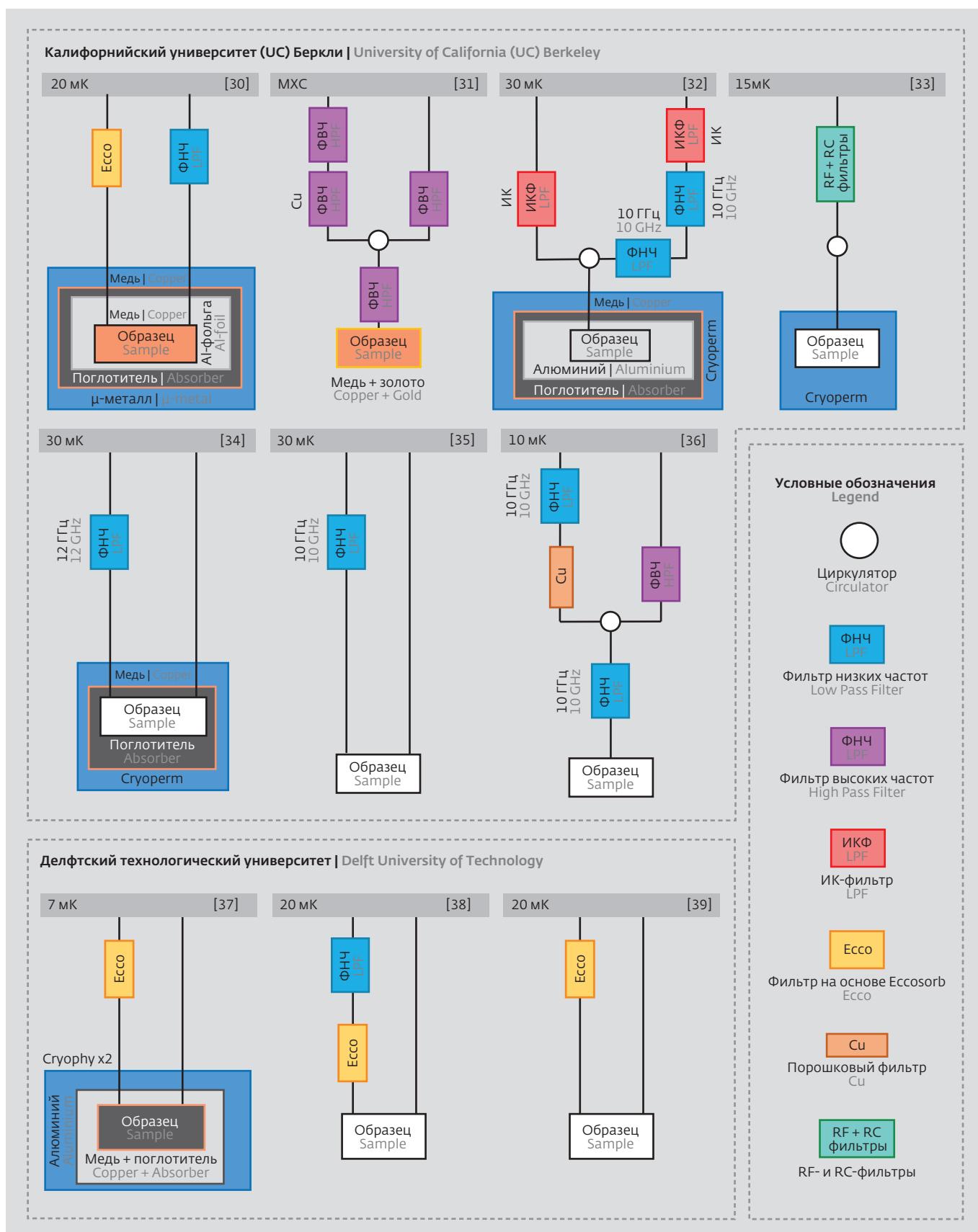


Рис.2. Схемы экранирования в University of California (UC) Berkeley и Delft University of Technology  
Fig.2. Shielding circuits in University of California (UC) Berkeley and Delft University of Technology

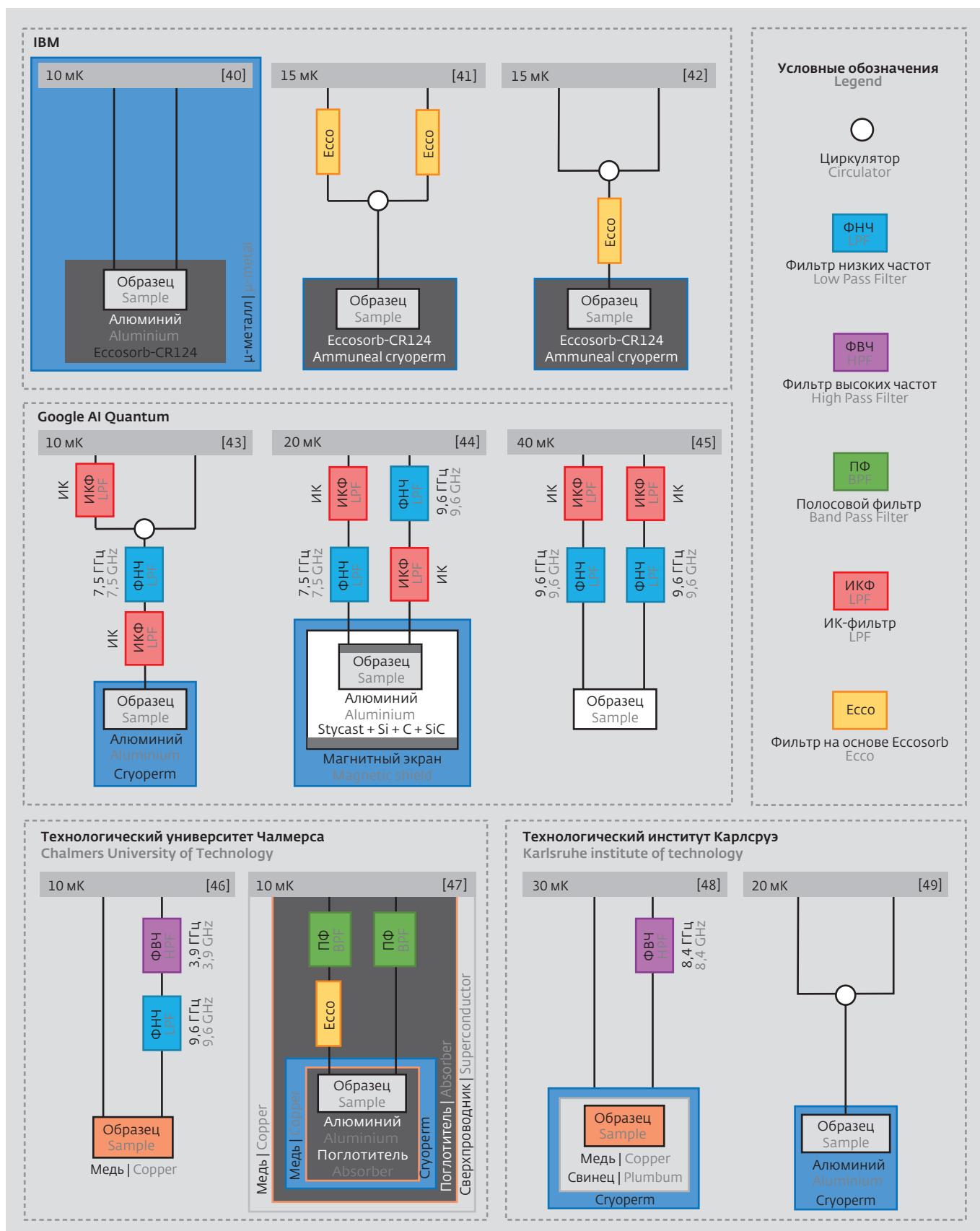


Рис.3. Схемы экранирования в IBM, Google AI Quantum, Chalmers University of Technology и Karlsruhe Institute of Technology (KIT)  
Fig.3. Shielding circuits in IBM, Google AI Quantum, Chalmers University of Technology and Karlsruhe Institute of Technology (KIT)



### **Chalmers University of Technology (Швеция)**

Держатели изготавливают из меди [46] или алюминия [47] (рис.3). Экранирование многоступенчатое и применяется как к держателю, так и ко всей нижней плите криостата [47]. Держатель окружает медный экран с поглощающим покрытием, далее идет экран Cryoperm. Вся нижняя ступень криостата окружена медным кожухом с поглощающим покрытием, затем ставится сверхпроводящий экран. Фильтрация сигнала происходит с помощью BPF (Band Pass Filter) и фильтра Eccosorb.

### **Karlsruhe Institute of Technology (KIT) (Германия)**

Материалы держателя – медь [48] и алюминий [49] (рис.3). В качестве экранирования используют Cryoperm [48, 49], к которому в некоторых случаях могут добавить свинцовый экран внутри [48]. Встречается использование промышленного фильтра BPF [48].

### **Yale University (США)**

Для держателей используют алюминий [50] или медь [51] (рис.4). Экранирование многоступенчатое: медный экран с поглощающим покрытием с угольной пылью (Carbon black), затем цилиндр из магнитомягкого сплава Alumetal (разновидность магнитомягкого сплава) [50]. Фильтры устанавливаются как LPF, так и Eccosorb [50].

По материалам держателей данных не приводится. Экранирование либо одинарное посредством Cryoperm [52], либо ступенчатое: медь с покрытием Styccast и угольной пылью и магнитомягкий

Ammuneal [53] (рис.4). Фильтрация осуществляется посредством фильтров LPF и Eccosorb [52, 53], причем Eccosorb в некоторых случаях располагают внутри экранов [52].

### **Université Pierre et Marie Curie (Франция), Royal Holloway University of London (Великобритания), University of Maryland (США)**

Держатели изготавливают из позолоченной меди [54] или алюминия [55] (рис.4). Эти группы объединяет двойное экранирование  $\mu$ -металлом, но в разных конфигурациях: вокруг держателя [56], вокруг всего криостата [55], комбинированный вариант (держатели и нижняя ступень криостата) [54]. В Royal Holloway дополнительно устанавливают сверхпроводящий свинцовый цилиндр [55]. Подход к фильтрации различен: BPF в Université Pierre et Marie Curie [54], LPF в University of Maryland [56].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализ экранирования квантовых схем в ведущих научных группах в области квантовых вычислений показывает, что выполняются требования к материалам экранов для электромагнитной защиты. Также рассмотренные системы экранов позволяют выявить некоторые закономерности в экранировании:

- многоступенчатость экранирования;
- использование специальных поглощающих излучение покрытий на основе эпоксидных смол Eccosorb или Styccast с добавлением частиц SiC или угольной пыли;

outside the screen they will be directed along it. The resulting field is attenuated inside the screen and amplified outside it, i.e., the field is displaced from the screen. This shielding is already dependent on the depth of field penetration at different frequencies ("skin effect") and starts to work well from frequencies above 1kHz. Non-magnetic and ferromagnetic materials are used for the shields which are chosen based on the depth of field penetration [22]. Among the possible ones are: copper, aluminium,  $\mu$ -metal, steel, zinc, etc.

Superconductors ensure good protection against the

alternating electromagnetic fields, in an ideal conductor there are no alternating electric and magnetic fields: currents flow over the surface without penetrating deep into the metal [19]. If there are no holes or gaps in the screen, there are no HF magnetic and electric fields either inside or outside the screen.

### **EXISTING SHIELDING SYSTEMS FOR QUANTUM CIRCUITS**

Described below are the superconductor quantum circuit shielding systems used by leading scientific groups in their measurement circuits.

### **Princeton University (USA)**

In the shielding schemes here copper is most commonly used as the sample holder material with the quantum circuit [12, 23] (Fig.1). In front of the holder an Eccosorb CR-110 based filter is placed in combination with an LPF (Low Pass Filter) standing outside the screens [12, 23, 24]. Behind the holder there is a screen with an absorption coating either based on Eccosorb CR-124 [23, 24] or using Styccast resin with SiC particles [12, 23]. The base of the shield is copper [12] or aluminium [23, 24], which is also superconductive. A  $\mu$ -metal screen [12, 23, 24] is then used in the shielding, in some cases a double

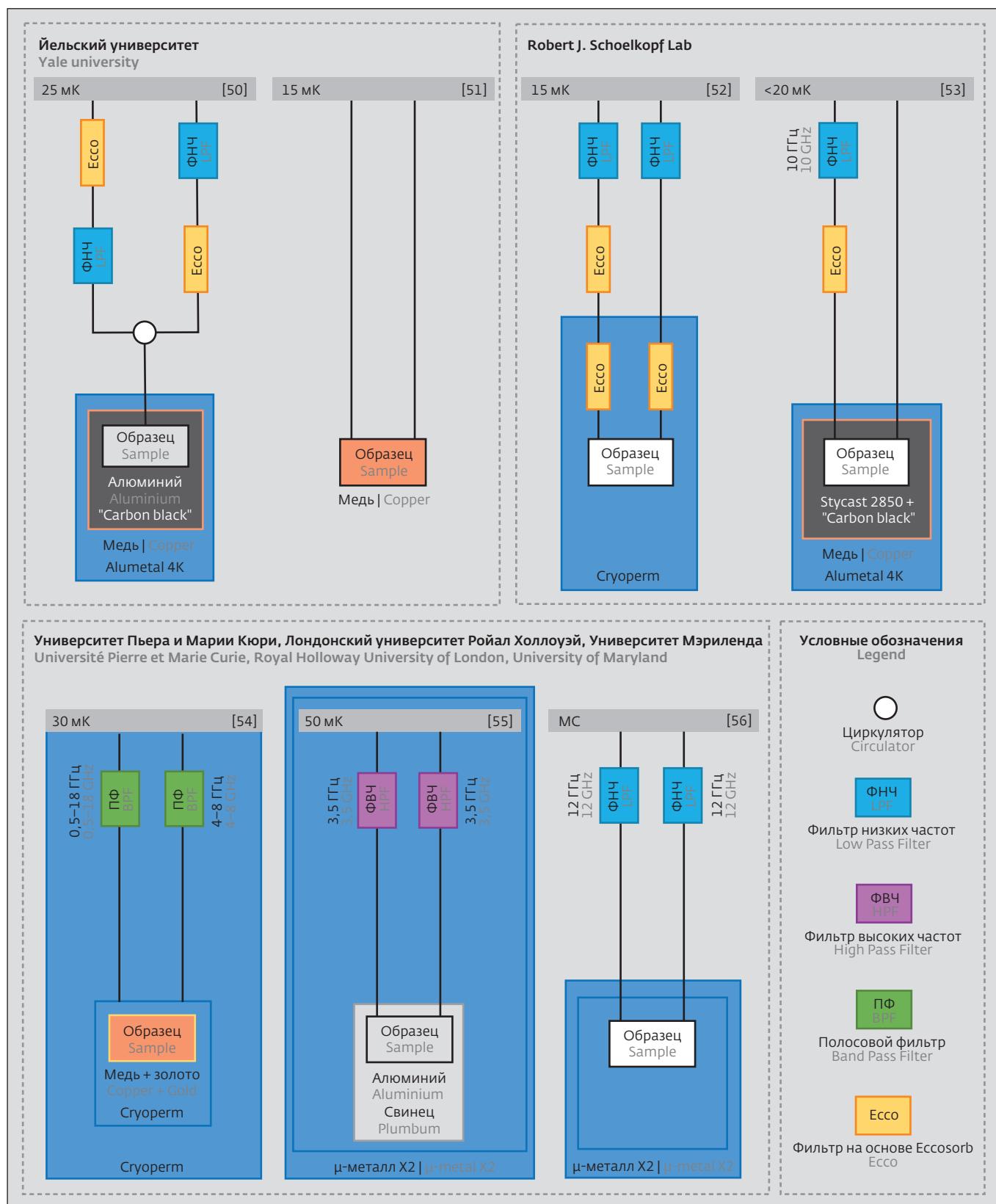


Рис.4. Схемы экранирования в Yale University, Robert J. Schoelkopf Lab, Université Pierre et Marie Curie, Royal Holloway University of London и University of Maryland

Fig.4. Shielding circuits in Yale University, Robert J. Schoelkopf Lab, Université Pierre et Marie Curie, Royal Holloway University of London and University of Maryland Robert J. Schoelkopf Lab (США)



- использование сверхпроводящих экранов или экранов из металлов с высокой относительной магнитной проницаемостью.

Однако при многообразии решений для защиты квантовых схем от ИК-излучения и других электромагнитных воздействий остается не до конца ясным, какая конфигурация и последовательность расположения экранов должна быть, какое количество экранов требуется и где необходимо располагать поглощающее покрытие. Таким образом, среди проблем в вопросе экранирования можно выделить:

- отсутствие единой последовательности экранов;
- неоднозначность набора материалов, применяемых в экранах;
- отсутствие критериев оценки эффективности систем экранирования.

Из всего этого ясно, что рекомендации для экранирования отсутствуют. Для решения этих проблем требуется теоретическое обоснование применяемых решений, что позволит отсечь избыточные варианты экранирования, а затем – экспериментальная проверка отобранных решений для выбора наиболее эффективной системы экранов.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Huang H., Wu D., Fan D. and Zhu X. Superconducting Quantum Computing: A Review. *Science China Information Sciences*, 63 (8), 1–32 (2020).
- Aruite F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574, 505–510 (2019).
- Krantz P. et al. A quantum engineer's guide to superconducting qubits. *Appl. Phys. Rev.*, 6, 021318 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5089550>.
- Lang K.M., Nam S., Aumentado J., Urbina C. and Martinis J.M. Banishing Quasiparticles From Josephson Junction Qubits: Why and How to do it, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 13 (2) (2003).
- Kreikebaum J.M. et al. Optimization of infrared and magnetic shielding of superconducting TiN and Al coplanar microwave resonators. *Supercond. Sci. Technol.*, 29, 104002 (2016); <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/10/104002>.
- Barends R. et al. Minimizing quasiparticle generation from stray infrared light in superconducting quantum circuits. *Appl. Phys. Lett.*, 99, 113507 (2011); <https://doi.org/10.1063/1.3638063>.
- Wang Z. et al. Cavity Attenuators for Superconducting Qubits. *Phys. Rev. Appl.*, 11, 014031 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014031>.
- Córdoles A.D. et al. Protecting superconducting qubits from external sources of loss and heat. *Appl. Phys. Lett.*, 99, 181906 (2011); <https://doi.org/10.1063/1.3658630>.
- Martinis J.M., Ansmann M.A., Aumentado J. Energy Decay in Superconducting Josephson-Junction Qubits from Nonequilibrium Quasiparticle Excitations. *Phys. Rev. Lett.*, 103, 097002 (2009); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.097002>.
- Ithier G. et al. Decoherence in a superconducting quantum bit circuit. Published online: arXiv:cond-mat/0508588 (2005); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.134519>.

screen [12]. Also, in some circuits Mylar (aluminised lavsan) is used in various places as an additional reflective layer [23, 24].

#### MIT Lincoln Lab (США), ETH Zurich (Switzerland)

The approach to shielding in these two groups is similar (Fig.1). The data on holder materials are rare, but based on work [25] it can be assumed that copper is preferred. Then, shields are installed, either of a single Cryoperm-10 (permalloy) [11, 26] or Cryoperm-10 with an aluminium cylinder inside [25, 27]. For specific protection against cosmic rays, a shielding of lead bars can be

applied [28]. Here too filters are also used: based on Eccosorb CR-110 [27, 28] or Eccosorb CR-124 [11], as well as LPF [26, 29] alone or combined with HPF (High Pass Filter) [25].

#### University of California (UC) Berkeley (USA)

Copper – uncoated [30] or gold-plated [31] as well as aluminium [32] are used to manufacture the holder (Fig.2). Then, either simple Cryoperm shielding [33] or staggered shielding is used: copper with absorption material [30, 32, 34], aluminium cylinder [32] or foil [30], Cryoperm [30, 32, 34]. The inlet line filtration is provided by

commercially available LPF [34–36] and HPF [31] filters or self-made ones based on Eccosorb resin [30] or copper powder [36].

#### Delft University of Technology (The Netherlands)

The data on the holder is scarce but a copper holder occurs when an absorptive coating is applied on the inside of the holder [37] (Fig.2). Then a multi-layer shielding is applied: an aluminium shield and two shields made of Cryophy (a kind of magnetically soft alloy) [37]. Eccosorb filters [37–39], located outside the screens, are used for filtering.



11. Krinner S. et al. Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems. EPJ Quantum Technology, 6, 2 (2019); <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0>.
12. Premkumar A. et al. Microscopic Relaxation Channels in Materials for Superconducting Qubits. Published online: arXiv:2004.02908 (2020).
13. Gyenis A. et al. Experimental realization of an intrinsically error-protected superconducting qubit. PRX Quantum, 2, 010339 (2021); <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.010339>.
14. Place A.P.M., Rodgers L.V.H., Mundada P. et al. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds. Nat. Commun., 12, 1779 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22030-5>.
15. Bründermann E., Hübers H., Kimmitt M.F. Terahertz Techniques. Springer, 2012. 386 p.
16. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорашкий Л.Г. и др. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов / Под ред. А.М. Чернушенко. М.: Радио и связь, 1990. 352 с.: ил.
17. Винников В.В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СЗТУ, 2006. 164 с.
18. Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. Л.: Изд-во "Энергия", 1969. 112 с.: ил.
19. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1979. 216 с.: ил.
20. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. 224 с.: ил.
21. Бобков Н.М. Лекции по общему конструированию РЭС. Электронный источник: [https://nntc.nnov.ru/sites/default/files/documents/Ecranirovaniye\\_electricheskix\\_i\\_magnitnych\\_polej.pdf](https://nntc.nnov.ru/sites/default/files/documents/Ecranirovaniye_electricheskix_i_magnitnych_polej.pdf).
22. Котельников И.А., Черкасский В.С. Скин-эффект в задачах: электронный учебник. Новосибирск, 2013. 79 с.
23. Place A.P.M. et al. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds. Published online: arXiv:2003.00024 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22030-5>.
24. Gyenis A. et al. Experimental realization of an intrinsically error-protected superconducting qubit. PRX Quantum 2, 010339 (2021); <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.010339>.
25. Yan F. et al. The Flux Qubit Revisited to Enhance Coherence and Reproducibility. Nature Communications 7, 12964 (2016); <https://doi.org/10.1038/ncomms12964>.
26. Sung Y. et al. Multi-level Quantum Noise Spectroscopy. Nature Communications 12, 967 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21098-3>.
27. Andersen C.K., Remm A., Lazar S. et al. Entanglement stabilization using ancilla-based parity detection and real-time feedback in superconducting circuits. npj Quantum Inf 5, 69 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0185-4>.
28. Vepsäläinen A.P. et al. Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence. Nature, 584,

### IBM (USA)

Most often no data are given for the holder material, however, [40] indicates that the holder is made of aluminium (Fig.3). The shielding is made as cylinder of Ammuneal cryoperm (a kind of magnetically soft alloy) with a coating of Eccosorb CR-124 inside [41, 42]. Also, in [40], based on Eccosorb CR-124 resin, the outer shell of the holder was made; here the  $\mu$ -metal shielding was applied to all stages of the cryostat. Eccosorb filters are often used [41, 42].

### Google AI Quantum (USA)

The holders are mainly made of aluminium [43, 44], in some cases

the holder lid is covered with an absorbing material based on Styccast resin with SiC particles [44] (Fig.3). Then a  $\mu$ -metal shield is installed [43, 44]. There is also a shielding design of in the form of an individual screen [2] over a sample with a quantum circuit, and an absorbing coating is also applied to the inside of such a screen. Line filtering takes place via industrial LPFs and LPFs for the infrared range [43–45].

### Chalmers University of Technology (Sweden)

The holders are made of copper [46] or aluminium [47] (Fig.3). The

shielding is multistage and applies to both the holder and the entire bottom plate of the cryostat [47]. THE HOLDER SURROUNDS A COPPER SHIELD WITH AN ABSORPTION COATING, followed by a Cryoperm shield. The entire lower stage of the cryostat is surrounded by an absorption coated copper casing followed by a superconducting shield. The signal is filtered using a BPF (Band Pass Filter) and an Eccosorb filter.

### Karlsruhe Institute of Technology (KIT) (Germany)

The holder is made either of copper [48] or of aluminium [49]



- P. 551–556 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2619-8>.
29. **Kjaergaard M.** et al. Programming a quantum computer with quantum instructions. Published online: arXiv:2001.08838 (2020).
  30. **Schwartz M.E.** Engineering Dissipation to Generate Entanglement Between Remote Superconducting Quantum Bits. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy in Physics/Schwartz Mollie Elisheva. 2016. 132 p.
  31. **Blok M.S.** et al. Quantum Information Scrambling in a Superconducting Qutrit Processor. Phys. Rev. X 11, 021010 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.021010>.
  32. **Eddins A.** et al. High-Efficiency Measurement of an Artificial Atom Embedded in a Parametric Amplifier. Phys. Rev. X 9, 011004 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.011004>.
  33. **Schaal S.** et al. Fast gate-based readout of silicon quantum dots using Josephson parametric amplification. Phys. Rev. Lett. 124, 067701 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.067701>.
  34. **Eddins A.** et al. Stroboscopic qubit measurement with squeezed illumination. Phys. Rev. Lett. 120, 040505 (2018); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.040505>.
  35. **Martin L.S., Livingston W.P., Hacohen-Gourgy S., Wiseman H.M., Siddiqi I.** Implementation of a canonical phase measurement with quantum feedback. Phys. Published online: arXiv:1906.07274 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0939-0>.
  36. **Colless J.I.** et al. Robust determination of molecular spectra on a quantum processor. Phys. Rev. X 8, 011021 (2018); <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.011021>.
  37. **Asaad S., Dickel C., Poletto S., Bruno A., Langford N.K., Rol M.A., Deurloo D., DiCarlo L.** Independent, extensible control of same-frequency superconducting qubits by selective broadcasting. npj Quantum Information 2, 16029 (2016); <https://doi.org/10.1038/npjqi.2016.29>.
  38. **Bultink C.C.** et al. Protecting quantum entanglement from leakage and qubit errors via repetitive parity measurements. Science Advances, V. 6, no. 12 (2020); <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay3050>.
  39. **Van Dijk J.P.G., Charbon E., Sebastian F.** The electronic interface for quantum processors. Microprocessors and Microsystems, 66, pp. 90–101 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2019.02.004>.
  40. **Córcoles A.D.** et al. Protecting superconducting qubits from external sources of loss and heat. Appl. Phys. Lett. 99, 181906 (2011); <https://doi.org/10.1063/1.3658630>.
  41. **Córcoles A.D., Magesan E., Srinivasan S.J., Cross A.W., Steffen M., Gambetta J.M., Chow J.M.** Detecting arbitrary quantum errors via stabilizer measurements on a sublattice of the surface code. Nature Communications 6, 6979 (2015); <https://doi.org/10.1038/ncomms7979>.
  42. **Chow J.M.** et al. Implementing a strand of a scalable fault-tolerant quantum computing fabric. Na-

(Fig.3). Cryoperm [48, 49] is used as shielding, to which a lead shield may be added internally in some cases [48]. Sometimes, an industrial BPF filter is used [48].

#### **Yale University (USA)**

Aluminium [50] or copper [51] is used for the holders (Fig.4). The shielding is multi-stage: a copper shield with an absorption coating with carbon dust ("Carbon black"), then a cylinder of Alumetal (a kind of magnetically soft alloy) [50]. Both LPF and Eccosorb filters are fitted [50].

No data is given for the holder materials. Shielding is either

single made of Cryoperm [52] or staggered: Styccast coated copper with carbon dust and magnetically soft Ammuneal [53] (Fig.4). Filtration is done by means of LPF and Eccosorb filters [52, 53], in some cases [52] with Eccosorb being placed inside the screens.

Université Pierre et Marie Curie (France), Royal Holloway University of London (Great Britain), University of Maryland (USA)

The holders are made either of gilded copper [54] or of aluminium [55] (Fig.4). These groups share dual  $\mu$ -metal shielding, but in different configurations:

around the holder [56], around the whole cryostat [55], a combined version (holders and the lower stage of the cryostat) [54]. Royal Holloway additionally installs a superconducting lead cylinder [55]. The filtration approach varies: BPF at Université Pierre et Marie Curie [54], HPF at Royal Holloway [55] and LPF at the University of Maryland [56].

#### **CONCLUSIONS**

Analysis of shielding of quantum circuits performed by the leading scientific groups in the field of quantum computing shows that the requirements to shielding



- ture Communications 5, 4015 (2014); <https://doi.org/10.1038/ncomms5015>.
43. **Chen Z.** Metrology of Quantum Control and Measurement in Superconducting Qubits. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy in Physics/ Chen Zijun. 2018. 241 p.
  44. **Kelly J.S.** Fault-tolerant superconducting qubits. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy in Physics. 2015. 207 p.
  45. **Sank D.T.** Fast, Accurate State Measurement in Superconducting Qubits. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy in Physics/ Sank Daniel Thomas. 2014. 247 p.
  46. **Scigliuzzo M.** et al. Phononic loss in superconducting resonators on piezoelectric substrates. New J. Phys. 22, 053027 (2020); <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab8044>.
  47. **Burnett J., Bengtsson A., Scigliuzzo M., Niepce D., Kudra M., Delsing P., Bylander J.** Decoherence benchmarking of superconducting qubits. npj Quantum Information volume 5, Article number: 9 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0168-5>.
  48. **Jerger M.** Experiments on Superconducting Qubits Coupled to Resonators. [Text]: Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften / Jerger Markus. 2013. 140 p.
  49. **Braumüller J., Marthaler M., Schneider A.** et al. Analog quantum simulation of the Rabi model in the ultra-strong coupling regime. Nat Commun 8, 779 (2017); <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00894-w>.
  50. **Wang Z., Shankar S., Minev Z.K., Campagne-Ibarcq P., Narla A., Devoret M.H.** Cavity Attenuators for Superconducting Qubits. Phys. Rev. Applied 11, 014031 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014031>.
  51. **Chow J.M.** Quantum Information Processing with Superconducting Qubits. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy / Jerry Moy Chow. 2010. 322 p.
  52. **Gao Y.Y.** Multi-Cavity Operations in Circuit Quantum Electrodynamics. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy. 2018. 182 p.
  53. **Chou K.S.** Teleported operations between logical qubits in circuit quantum electrodynamics. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy. 2018. 241 p.
  54. **Schmitt V.** Design, fabrication and test of a four superconducting quantum-bit processor. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy / Vivien Schmitt. 2015. 161 p.
  55. **Burnett J.** High Precision readout of superconducting resonators for analysis of slow noise processes. [Text]: A Dissertation in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy. 2013. 141 p.
  56. **Yeh J., LeFebvre J., Premaratne S., Wellstood F.C. and Palmer B.S.** Microwave attenuators for use with quantum devices below 100 mK. Journal of Applied Physics 121, 224501 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4984894>.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

materials for electromagnetic shielding are fulfilled. The analysed shielding systems allow of revealing some regularities in shielding:

- multi-stage shielding;
- use of special radiation absorbing coatings based on Eccosorb or Styccast epoxy resins with the addition of SiC or carbon dust particles;
- use of superconducting shields or shields made of metals with high relative magnetic permeability.

However, with a variety of solutions for protecting quantum circuits from IR radiation and

other electromagnetic interference, it is not entirely clear what the configuration and sequence of shielding should be, how many shields are required and where the absorption coating should be placed. Thus, among the problems in the shielding issue are:

- lack of criteria for assessing the effectiveness of shielding systems;
- ambiguity in the set of materials used in the shields;
- lack of a clear idea of how well the shielding performs the task of protecting the quantum circuit from external influences.

It follows from the above that there are no recommendations for shielding. To solve these problems, a theoretical justification of the applied solutions is required to screen out redundant shielding options and perform afterwards the experimental testing of the selected solutions to choose the most effective shielding system. ■

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



# КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Четырнадцатая международная специализированная выставка

**29 - 31 марта 2022**

Россия, Москва,  
ЦВК «Экспоцентр», павильон 1



## Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК) и т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация



Специальный  
раздел:  
**КЛЕИ И  
ГЕРМЕТИКИ**



## Информационная поддержка:



## Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»  
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд,  
дом 7, строение 10, офис 507 | Тел.: 8 495 988-1620  
E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru



[youtube.com/user/compoexportrussia](https://youtube.com/user/compoexportrussia)



@compoexportrussia



@ocompo

## Организаторы:

