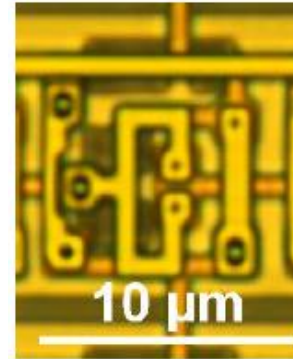


**Разработка схем безындуктивной
джозефсоновской логики на основе
0- и π -контактов**

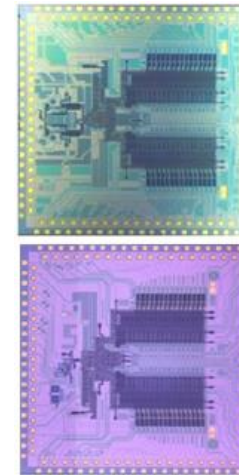
Актуальность работы

Примеры приборов и устройств:

- Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП и АЦП)
- Децимационный фильтр
- Времяизмерительные цифровые системы (TDC)
- Цифровой коррелятор
- Машрутизатор
- Арифметико-логическое устройство (АЛУ)
- И.т.д.

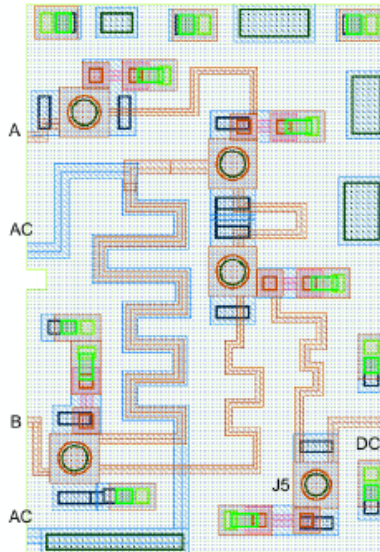


Цифровой приемник X-диапазона. HYPRES, Inc.



32 GS/s RSFQ ADC + digital mixer + digital filters,
~ 10 - 100 K JJ/chip

Сдвиговой регистр
809к дж. переходов



- V.K. Semenov, Y.A. Polyakov, S.K. Tolpygo, IEEE Trans. Appl. Supercond., 27(4), 1301509 (2017)

Преимущества

- Высокие тактовые частоты 10-100 ГГц
- Высокая энергоэффективность
- Возможность интеграции с квантовыми сверхпроводниковыми компьютерами

Проблемы

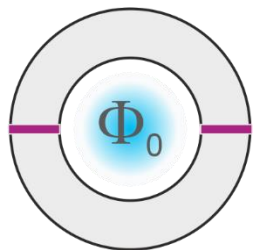
- Большие наведенные токи
- Взаимная магнитная индукция между различными компонентами
- Микронные размеры

Одноквантовая память
0.9 Мбит/см²

JJ: $J_c = 600$ мкА/мкм²

- V.K. Semenov, Y.A. Polyakov, S.K. Tolpygo, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29(5), 1302809 (2019)

Кинетическая индуктивность



$$L \sim \Phi_0 / I_c$$

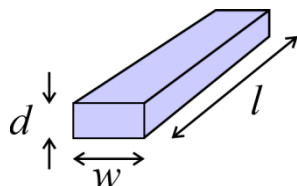
Уменьшение размера геометрической индуктивности < 250 нм приводит к экспоненциальному росту взаимной индукции и величине наведенных токов

Substitution: geometrical inductor -> kinetic inductor

❖ The critical current of the inductor, $I_{ck} > I_c$

❖ The inductance value

$$L_k = \Phi_0 / I_c \sim 20 \text{ [pH]} \text{ at } I_c = 0.1 \text{ [mA]}$$



$$I_{ck} \propto wd$$

$$I_{ck} / I_c \geq 4$$

$$L_k \propto l / (wd)$$

$$L_k = \Phi_0 / I_c$$

$$l \geq 0.9 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$wd \geq 0.014 \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$$

MoN_x,
Nb-Ti-N,
NbN,

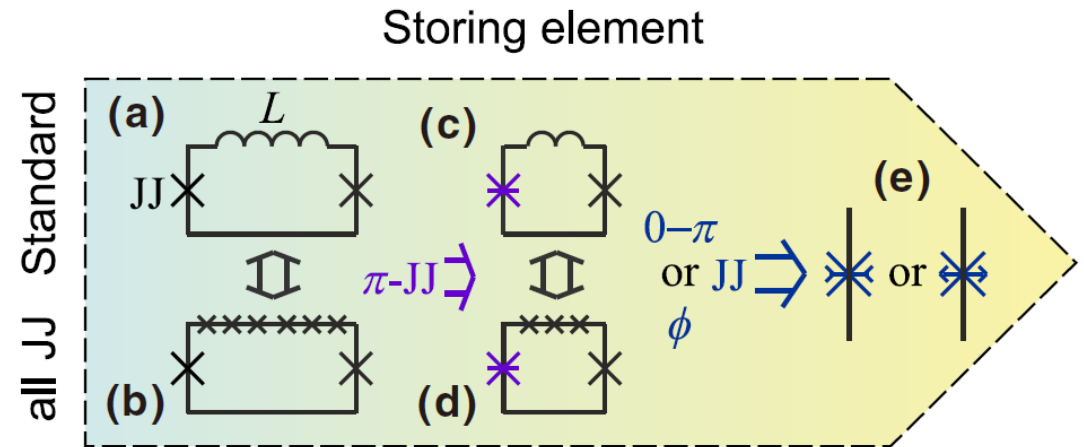
Comparison of the inductor and the JJ area at different values of the minimum feature size

✓ At $w = 350$ nm: $d \geq 40$ nm, $lw \geq 0.32 \mu\text{m}^2 \sim a_{JJ} = \pi w^2 = 0.4 \mu\text{m}^2$ (MIT Lincoln Laboratory)

○ At $w \geq d \Rightarrow w = d = 120$ nm: $lw \geq 108000 \text{ nm}^2$

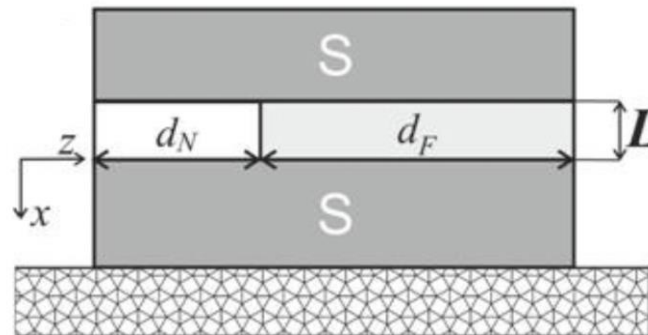
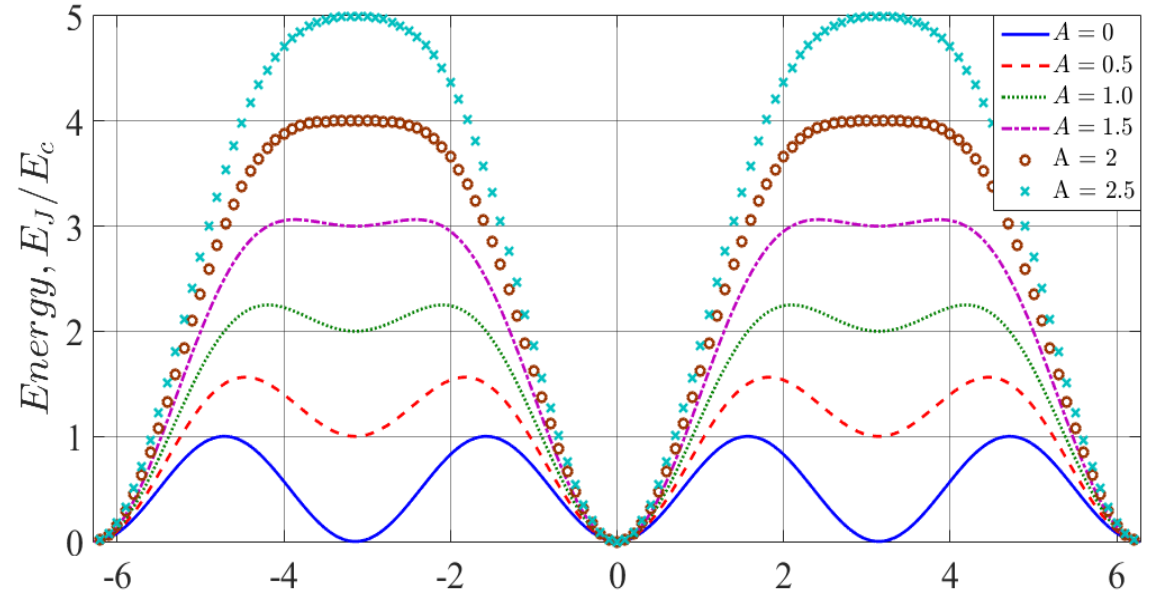
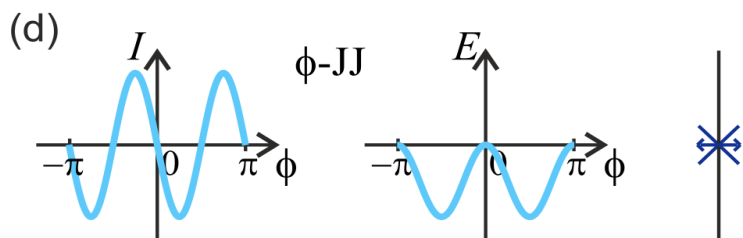
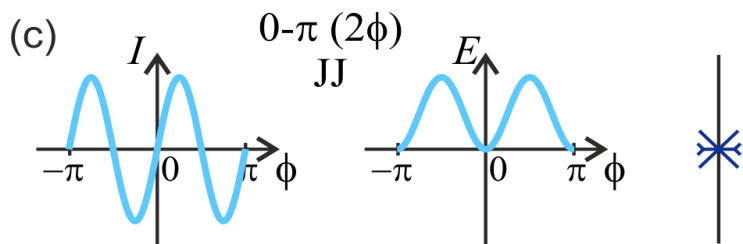
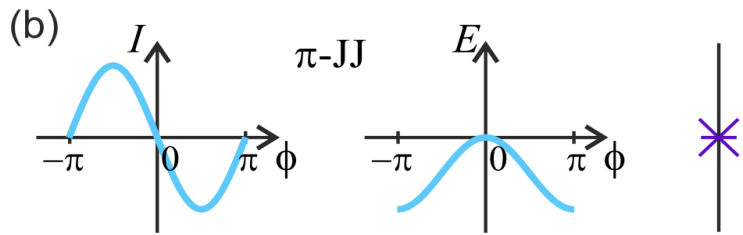
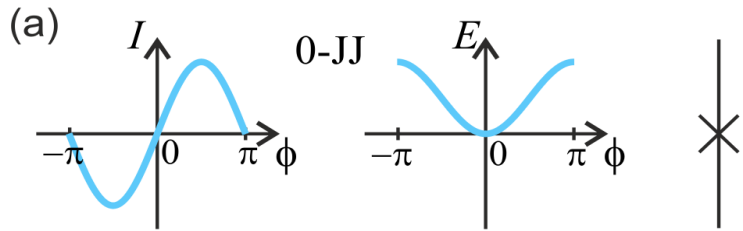
All-Josephson junction (all-JJ) logic cells

- Информация хранится в **фазе бистабильного джозефсоновского контакта**;
- В разработанных схемах **отсутствуют соединительные индуктивности**. Электрические цепи содержат **только джозефсоновские контакты**.

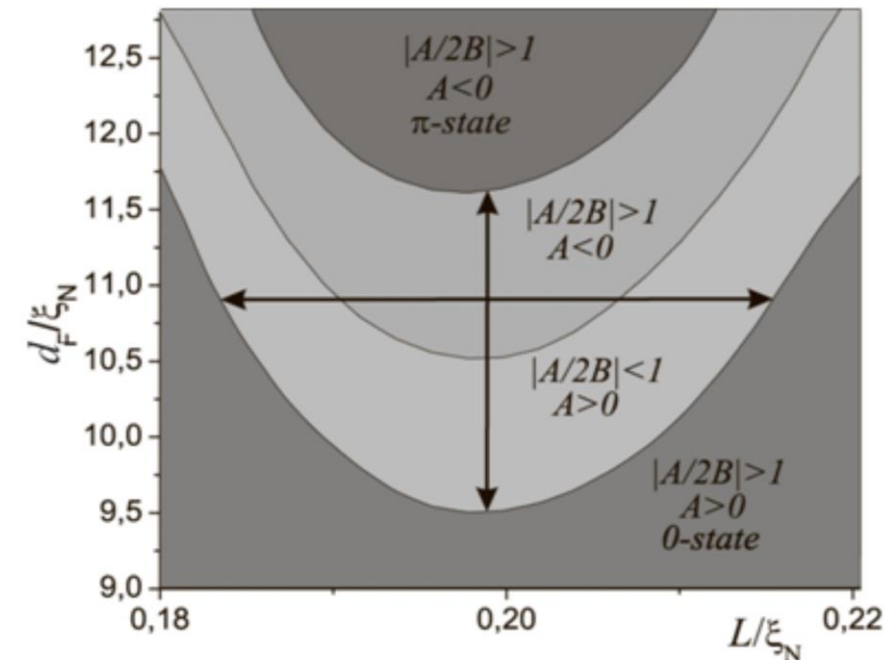


Джозефсоновские контакты

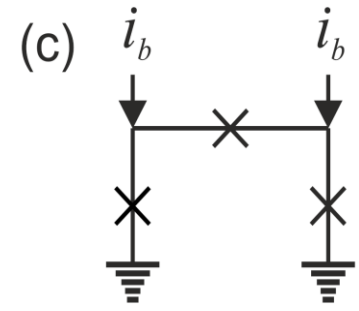
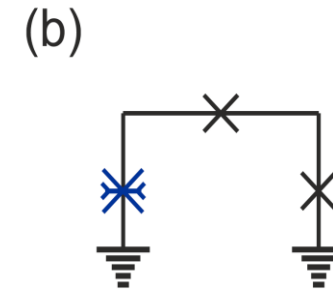
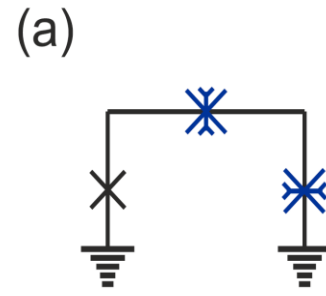
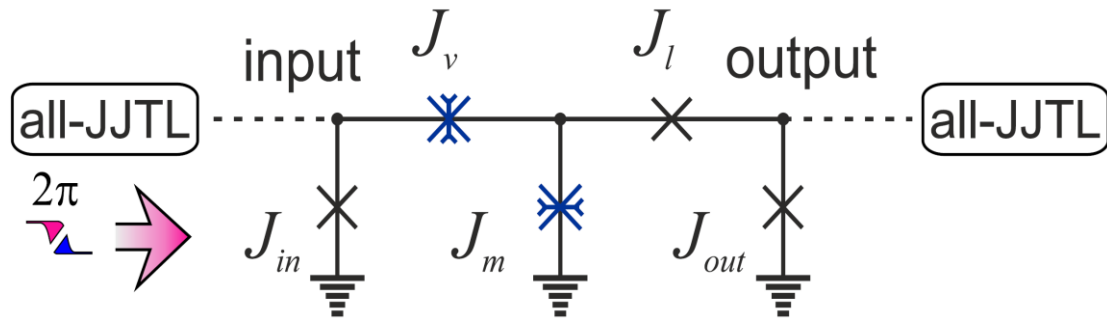
$$I_S(\varphi) = A \sin(\varphi) + B \sin(2\varphi) + \dots$$



- Н. В. Кленов и др.,
Журнал
радиоэлектроники, 5,
2013.



Фазовая логика на 2φ контактах



Cell names	Number of JJs	Critical margins	Areas	Bias current	Areas (RSFQ)	Bias current (RSFQ)
JTL	4	71%	$225\mu\text{m}^2$	$90\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$180\mu\text{A}$
DFF	5	68%	$375\mu\text{m}^2$	$63\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$212\mu\text{A}$
NDRO	9	55%	$625\mu\text{m}^2$	$487\mu\text{A}$	$2500\mu\text{m}^2$	$863\mu\text{A}$
Merger	8	72%	$550\mu\text{m}^2$	$174\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$375\mu\text{A}$
Splitter	7	70%	$494\mu\text{m}^2$	$160\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$309\mu\text{A}$
OR	18	37%	$1263\mu\text{m}^2$	$259\mu\text{A}$	$2500\mu\text{m}^2$	$475\mu\text{A}$
AND	18	85%	$1263\mu\text{m}^2$	$220\mu\text{A}$	$2500\mu\text{m}^2$	$530\mu\text{A}$
XOR	19	20%	$1428\mu\text{m}^2$	$290\mu\text{A}$	$2500\mu\text{m}^2$	$435\mu\text{A}$
PTL driver	4	81%	$429\mu\text{m}^2$	$93\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$265\mu\text{A}$
PTL receiver	4	81%	$369\mu\text{m}^2$	$107\mu\text{A}$	$625\mu\text{m}^2$	$252\mu\text{A}$
DC/SFQ converter	3	98%	$479\mu\text{m}^2$	$48\mu\text{A}$	$1875\mu\text{m}^2$	$450\mu\text{A}$
SFQ/DC converter	8	87%	$876\mu\text{m}^2$	$141\mu\text{A}$	$3125\mu\text{m}^2$	$1025\mu\text{A}$

- Haolin Cong et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 27(4), 1301509 (2023)

φ КОНТАКТ НА ОСНОВЕ 0 И π КОНТАКТОВ

Energy of the circuit with single π junction with critical energy B and phase φ and two equal 0 junctions with critical energy A and phases φ_1 and φ_2 :

$$E = A(1 - \cos(\varphi_1)) + A(1 - \cos(\varphi_2)) + B(\cos(\varphi) - 1)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi = 0$$

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\varphi_1 = -\varphi/2$$

$$E = 2A(1 - \cos(\varphi/2)) + B(\cos(\varphi) - 1)$$

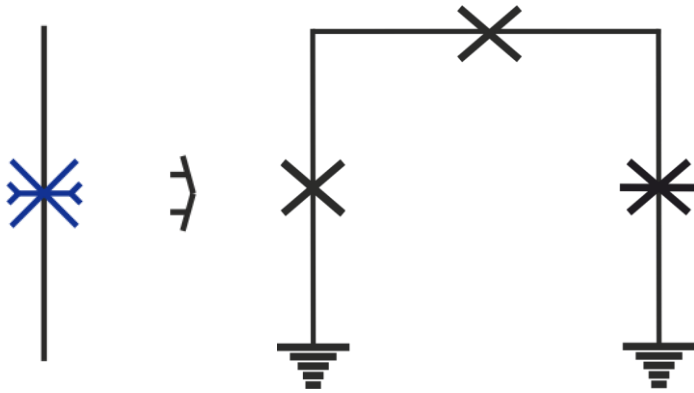
$$dE/d\varphi = 0 \rightarrow \varphi = \pi n, \varphi = \pm 2a \cos(A/2B)$$

If $d^2E/d\varphi^2 > 0$ in the equilibrium point then solution is stable.

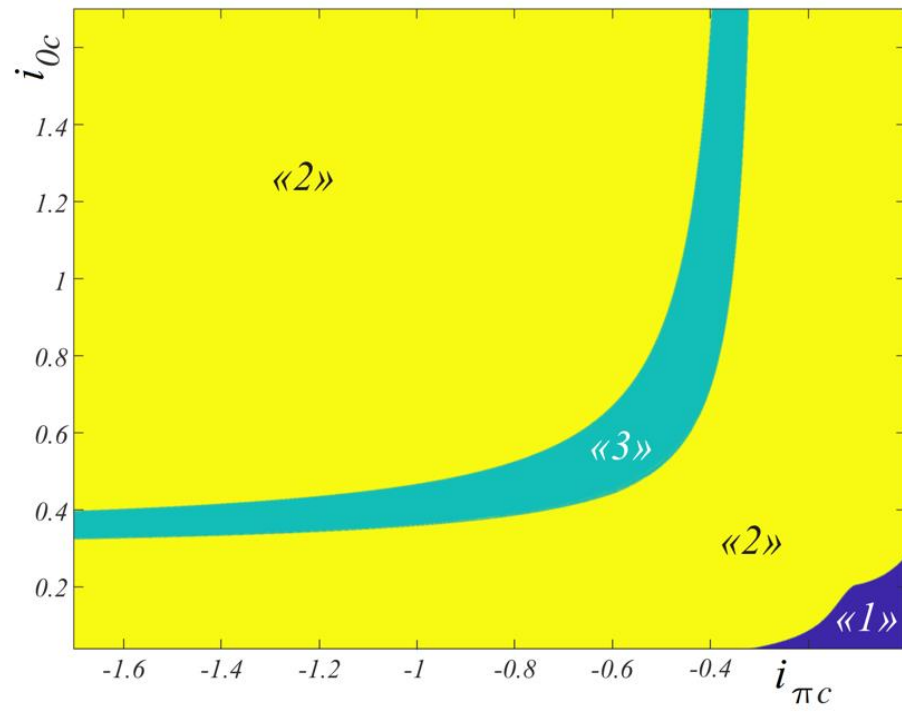
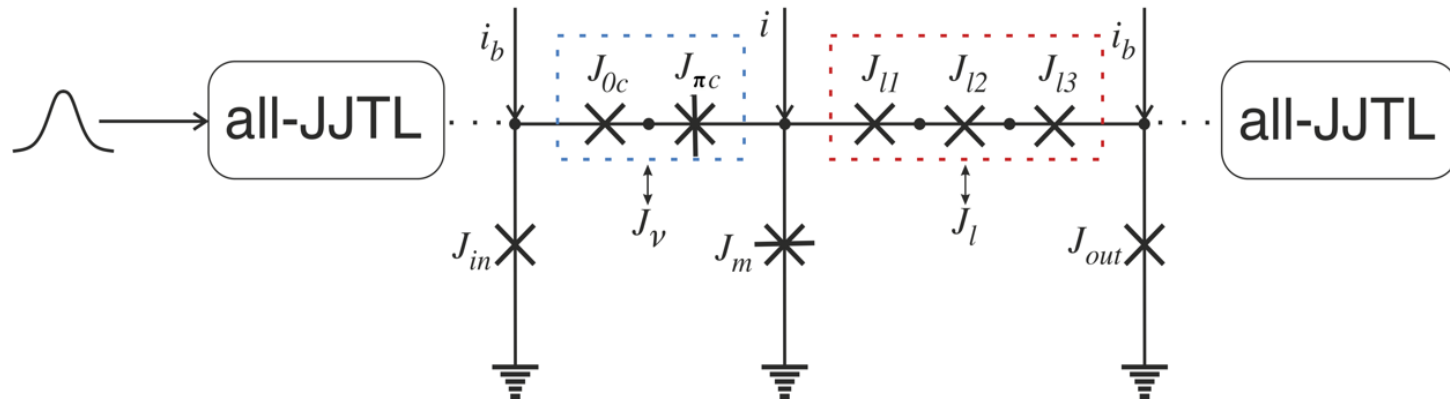
$$d^2E/d\varphi^2(0) = A/2 - B: \text{ stable at } A > 2B$$

$$d^2E/d\varphi^2(\pi) = -B: \text{ this solution is always unstable.}$$

$$d^2E/d\varphi^2(\pm 2a \cos(A/2B)) = -\frac{A^2}{4B} + B: \text{ stable if } 2B > A$$

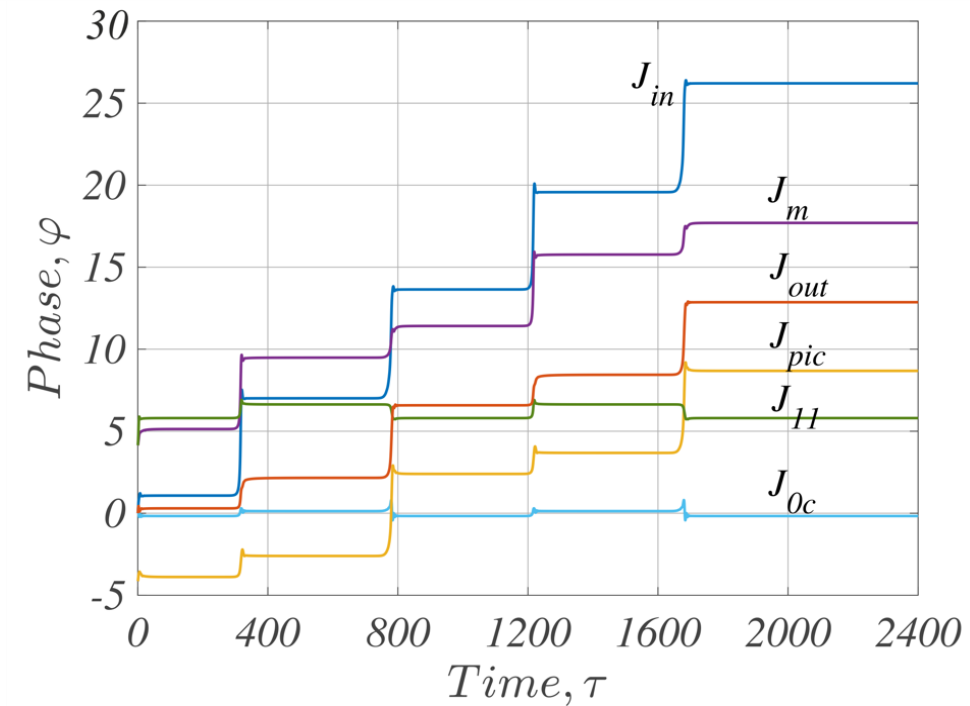
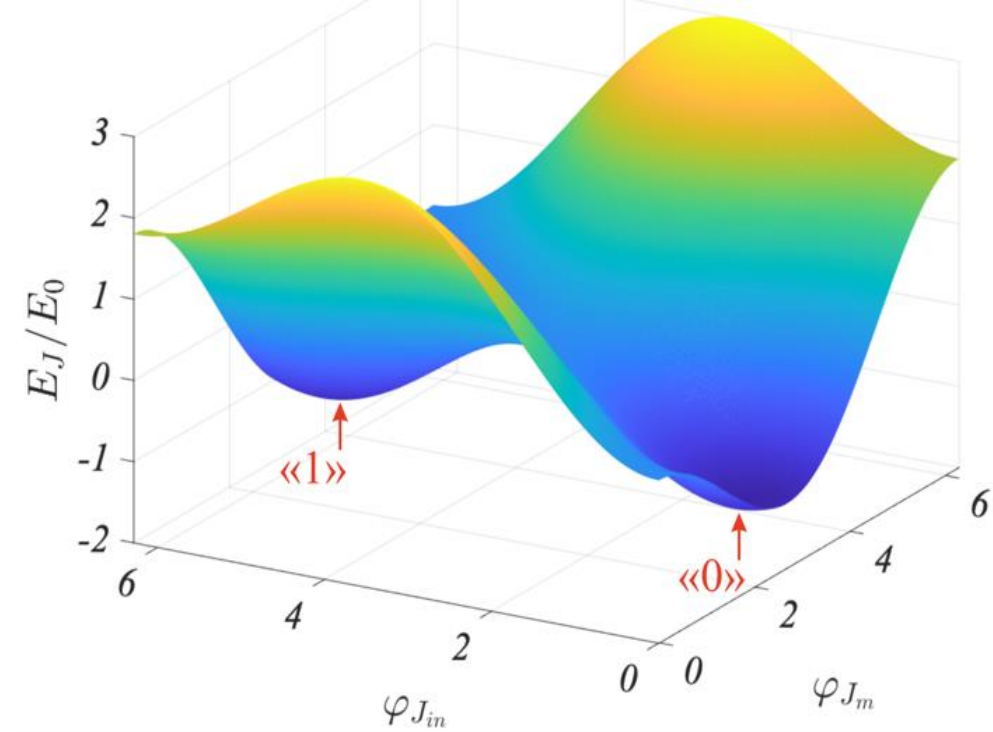


Базовый блок

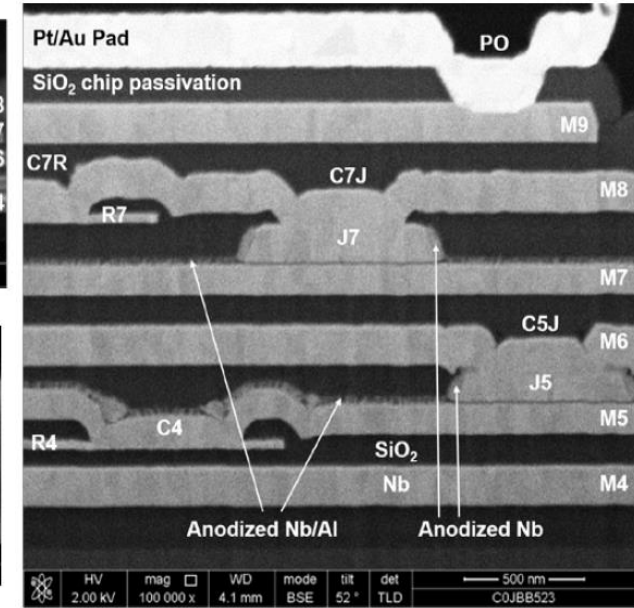
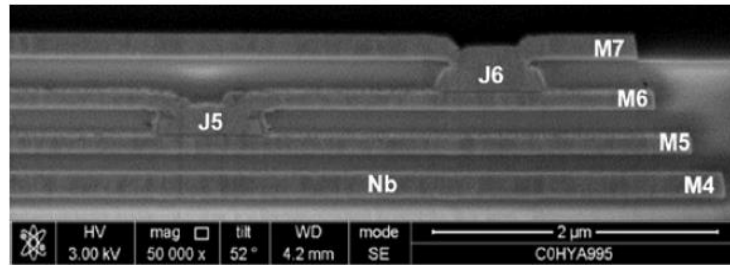
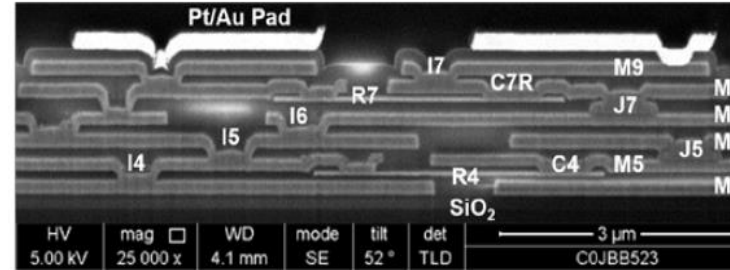
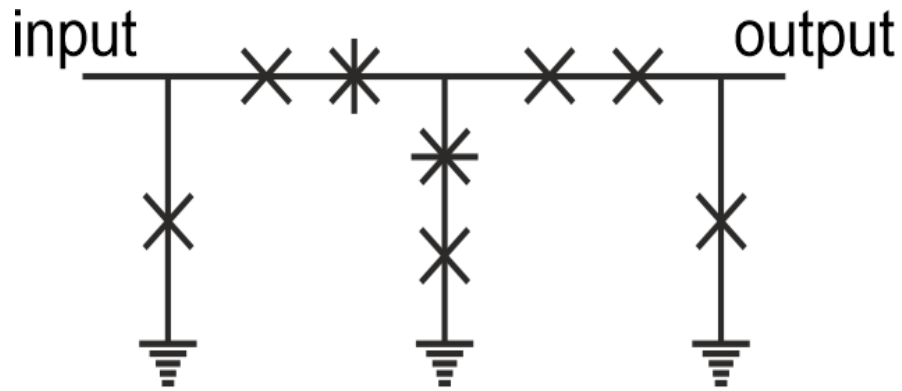


Синий цвет –
ограничитель (1);
Желтый – режим линии
передачи (2);
Голубой – режим деления
частоты пополам (3).

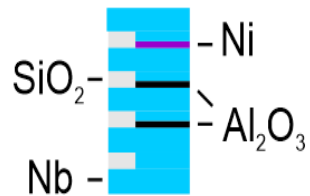
- A. A. Maksimovskaya et al.,
Journal of Experimental and
Theoretical Physics Letters.
IF: 1.532 (Editorial's
choice).



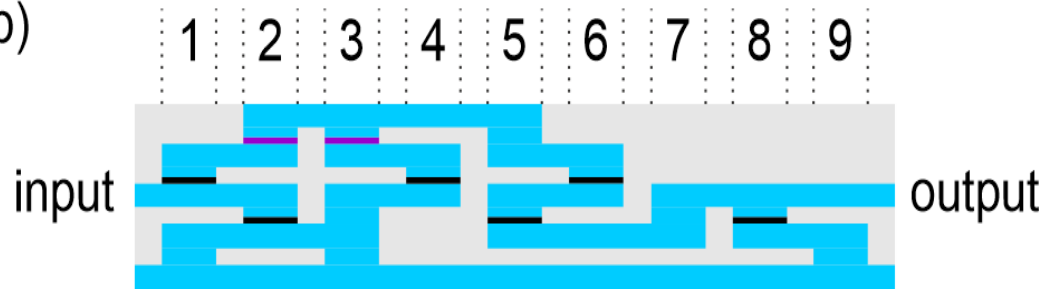
Практическая реализация



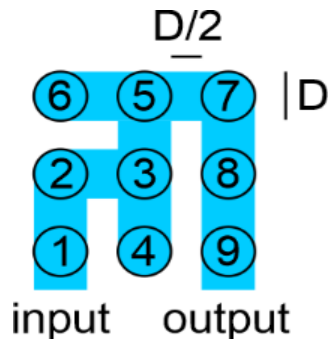
a)



b)



c)



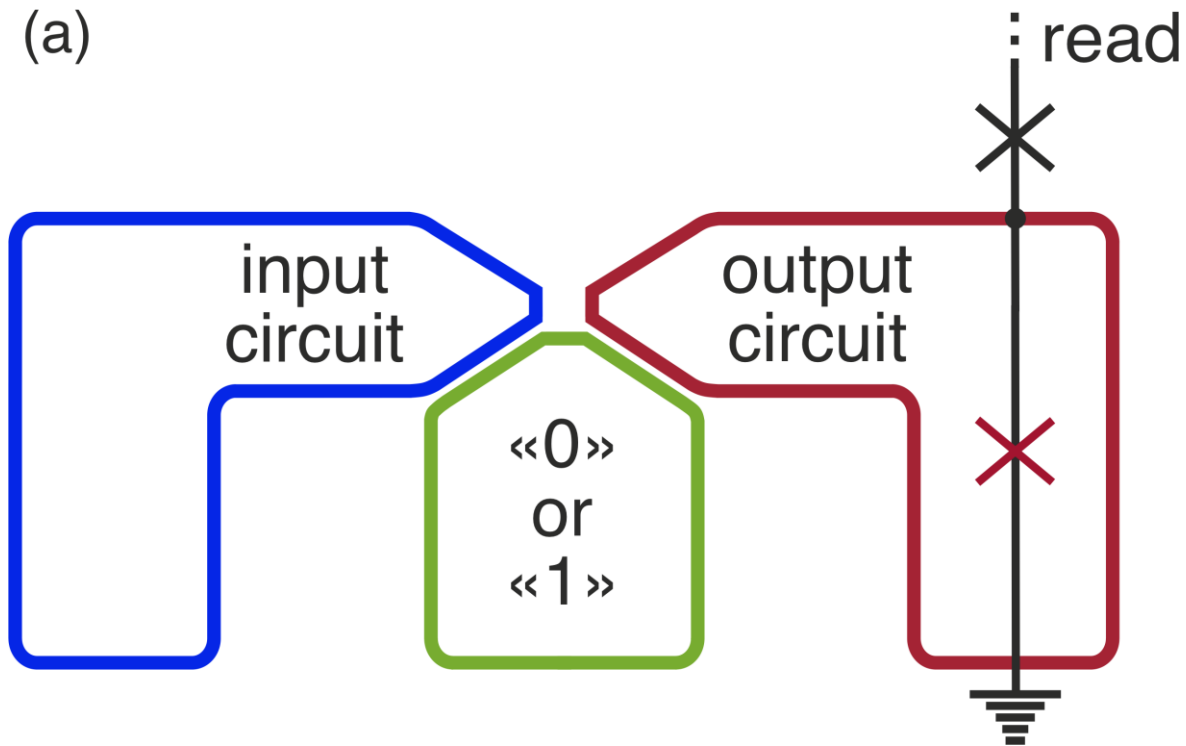
Площадь ячейки:
 $A = 16D^2 = 27,9,4,1 \text{ мкм}^2$

1. S. K. Tolpygo et al., “Planarized Fabrication Process With Two Layers of SIS Josephson Junctions and Integration of SIS and SFS π -Junctions,” IEEE Trans. Appl. Supercond. 29(5), 1101208 (2019).

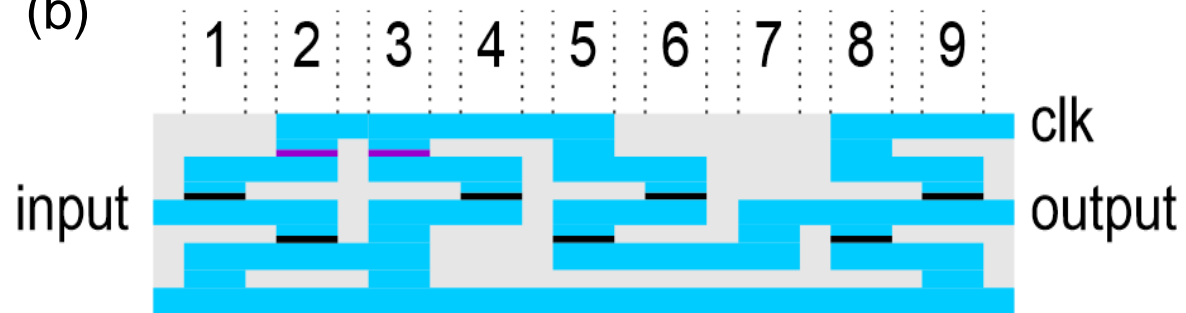
2. S. K. Tolpygo et al., in Applied Superconductivity Conference, ASC 2020 Virtual Conference, 49, Vol. 14 (Superconductivity News Forum (SNF), 2021), p. STP669

Управляемые запоминающие схемы

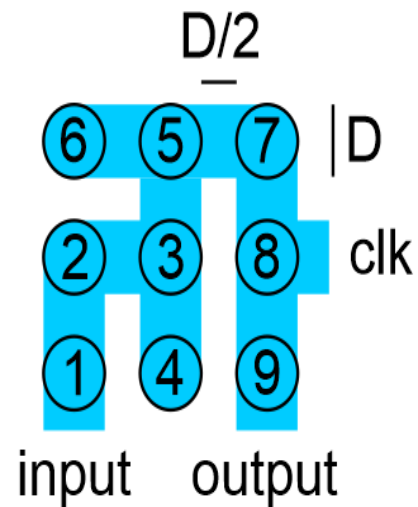
(a)



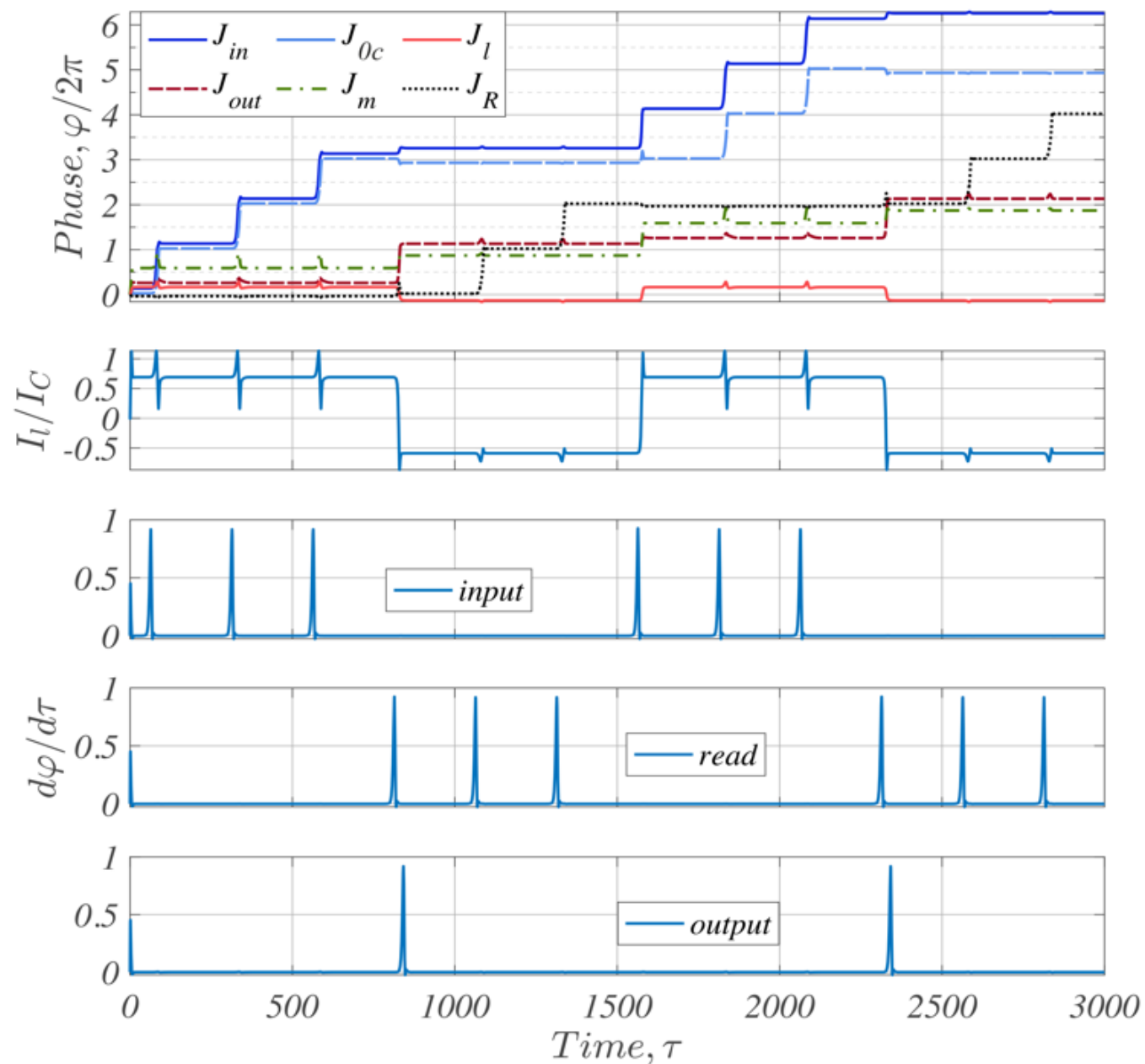
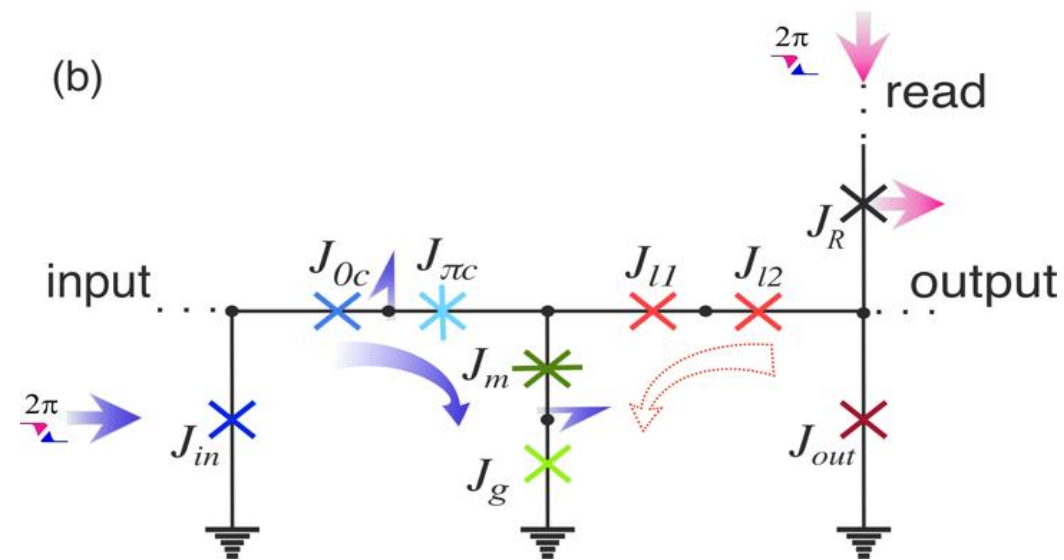
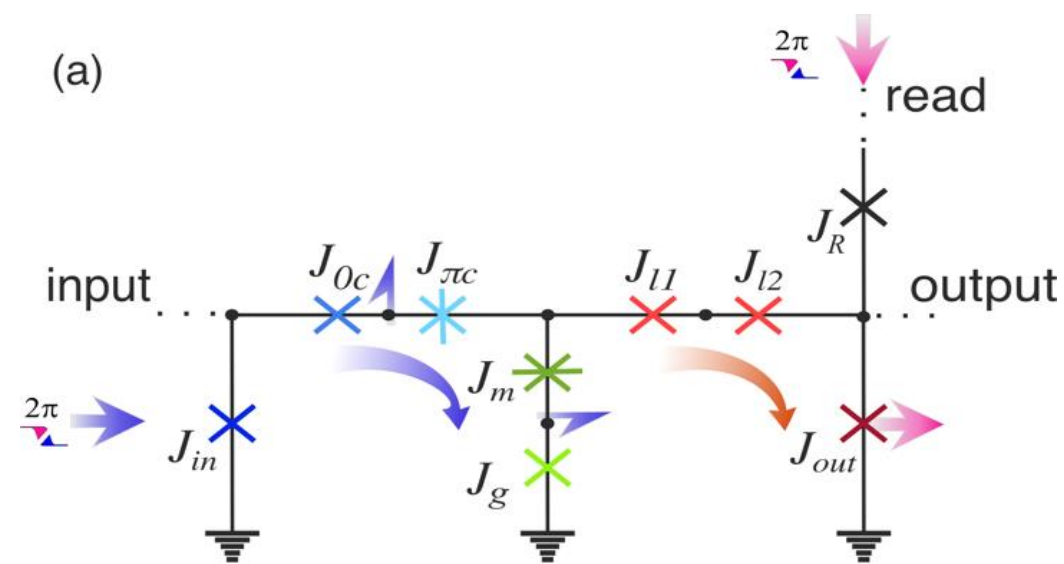
(b)



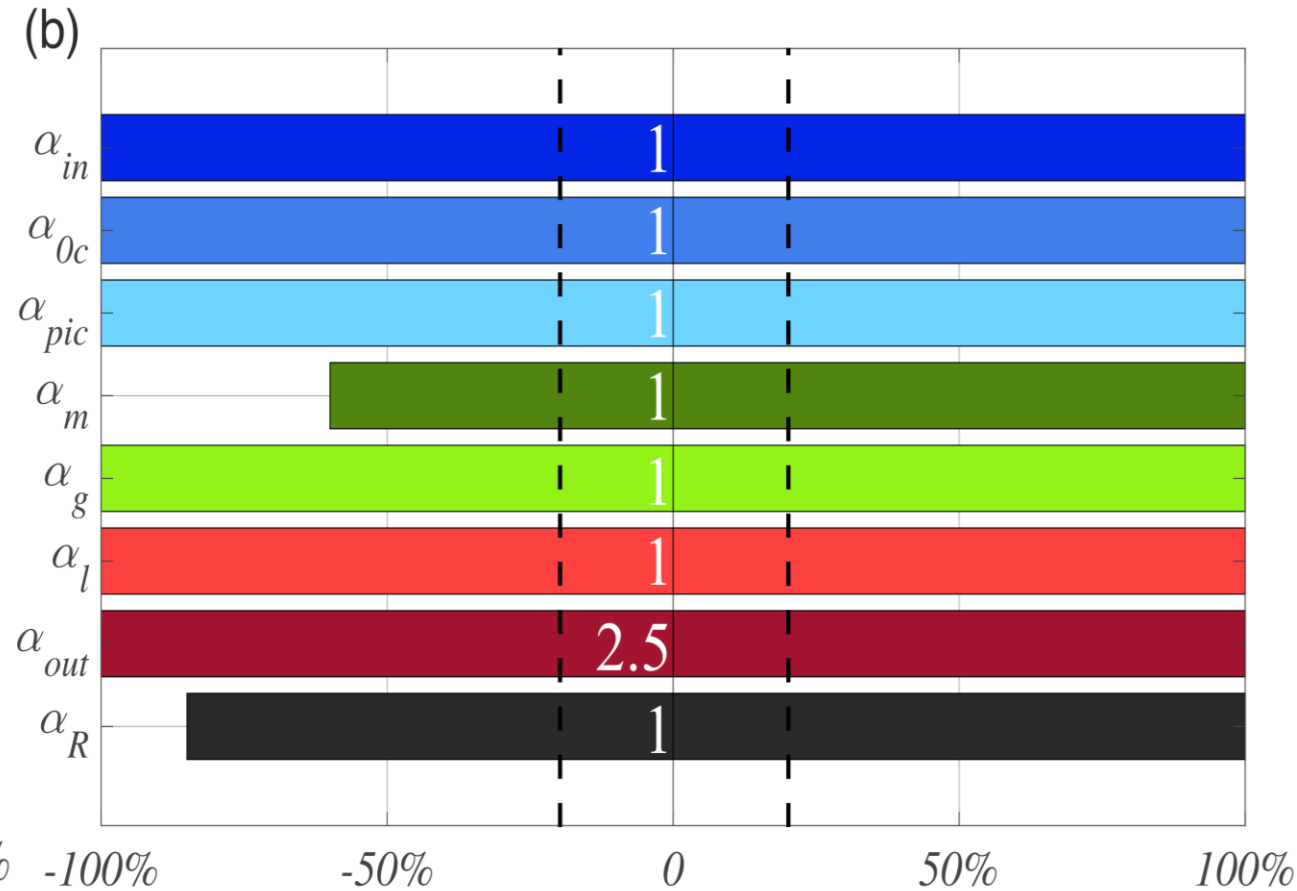
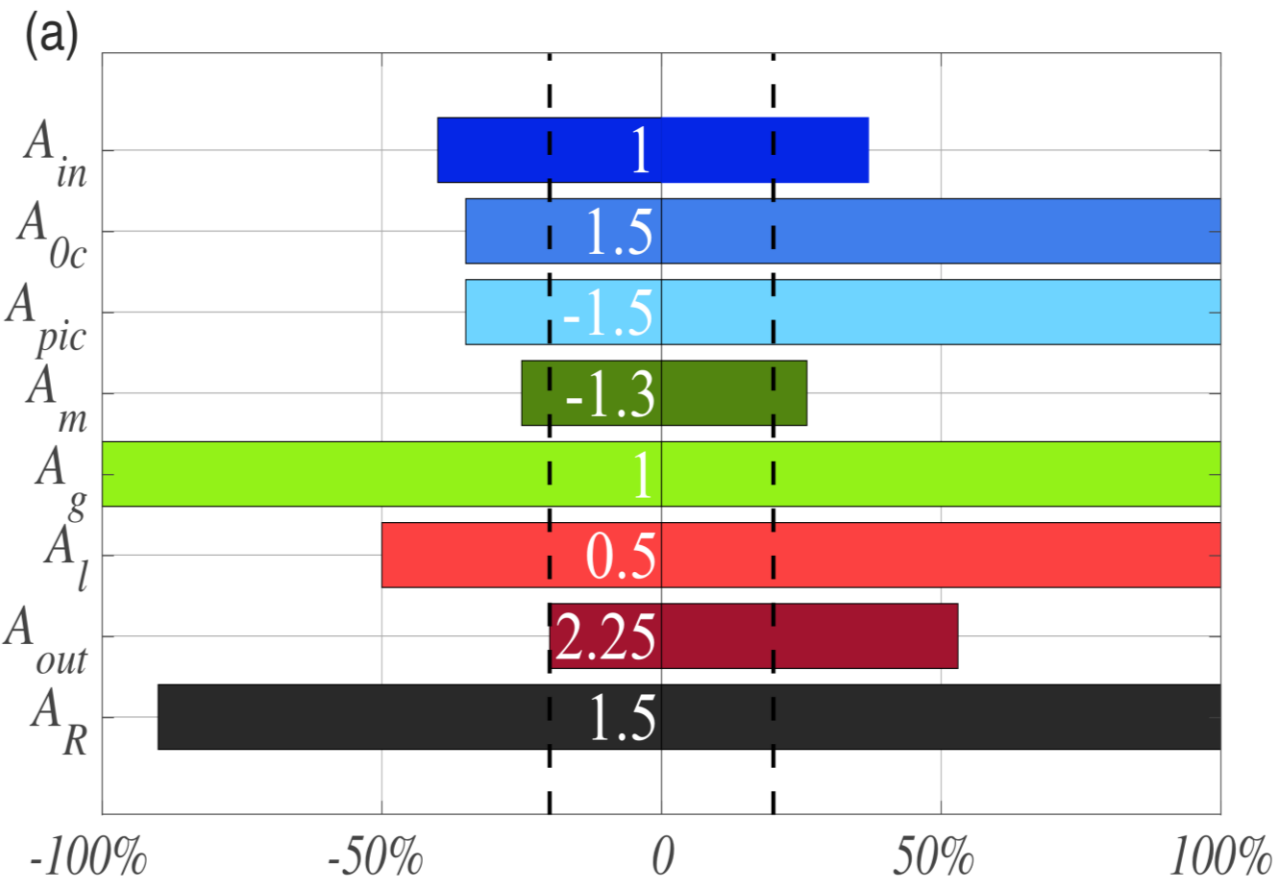
(c)



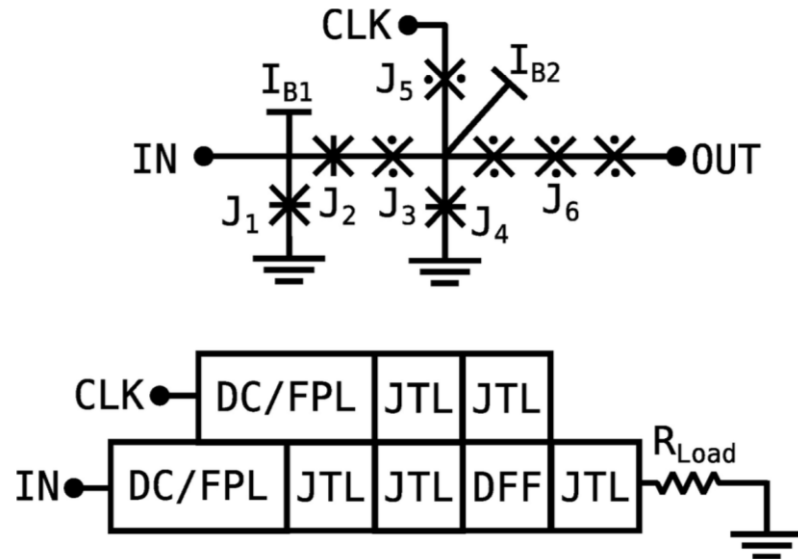
Запись и считывание состояний



Рабочие диапазоны критических токов (а) и параметров затухания (b)



Проблемы безындуктивной логики на основе 0 и π контактов



- + Разработана полноценная библиотека схем
- + Приведены тактовые частоты и время задержки
- + Учтено влияние паразитных индуктивностей (<math><1\text{pH}</math>)

- Отсутствуют оценки рабочих диапазонов параметров
- Нет теоретического обоснования возникновения бистабильности в ячейках

Cell	Delay (ps)	Test freq. (GHz)	Cell size (μm^2)
JTL	0.28	125	0.65
SPL	0.35	100	1.8
Merger	1	90	2
DFF	0.75	90	2.1
AND	2.7	90	9.3
OR	2.95	90	9.3
DC/FPL*	1.1	100	1.4

- S. Razmkhah and M. Pedram, arXiv - PHYS – Superconductivity, DOI:arxiv-2308.12474 (2023)

Спасибо за внимание!