

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-183

P8-96-183

С.В.Учайкин

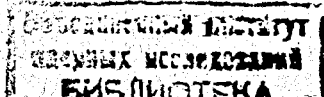
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
КМОП-ПРИБОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1996

1 Введение

В число основных элементов современных ускорителей входят сверхпроводящие магниты и резонаторы, охлаждаемые сверхтекучим гелием. Нарушение режима охлаждения приводит к переходу части сверхпроводящей обмотки или рабочей поверхности резонатора в резистивное состояние с выделением всей запасённой энергии в малом объёме. Следствием этого может быть разрушение всей системы. Изучение процессов теплопередачи в сверхтекучем гелии позволяет накопить экспериментальные данные с целью прогнозирования подобных случаев и принятия мер безопасности. Оборудование для подобных экспериментов должно измерять температуру во многих точках исследуемого объёма с высокой скоростью (порядка 10 мкс, см., например, [1]). Использование резистивных датчиков температуры и четырёхточечного метода опроса обуславливает большое количество электрических вводов в охлаждаемую часть. Это увеличивает расход криогенной жидкости и снижает помехоустойчивость системы. Значительно сократить число соединительных проводов позволяет использование охлаждаемого коммутатора, последовательно подключающего датчики температуры к измерительным цепям.



В литературе (см., например, [2, 3, 4, 6, 7, 8]) описаны работавшие при температуре до 4,2 К коммутаторы, предназначавшиеся для контроля медленно изменявшихся параметров. В этих публикациях не содержится информация о характере изменений большинства основных характеристик при низких температурах.

При построения системы для быстрых измерений низких температур, предназначенной для исследований процессов теплопередачи в жидком и сверхтекучем гелии [9, 10], были исследованы основные характеристики микросхем КМОП и HCMOS серий при температуре до 4,2 К, а также работоспособность выбранных микросхем при $T = 1,4 \div 4,2$ К. В статье приведены результаты исследований.

2 Методика

С целью выбора элементной базы для охлаждаемого коммутатора аналоговых сигналов была изучена работа несколько типов отечественных и зарубежных интегральных мультиплексоров при низких температурах. В отличие от проводившихся испытаний серийных приборов [2, 4, 6], исследовались мультиплексоры при малых величинах токов $0,1 \div 100$ мкА, поскольку именно такими токами обычно запитываются низкотемпературные полупроводниковые термометры. Были также определены временные характеристики мультиплексоров и зависимость сопротивления канала от напряжения аналоговых входов.

Основными характеристиками мультиплексоров служат: сопротивление включенного канала R_{ON} , согласование каналов ΔR_{ON} , ток утечки закрытого канала I_L , время переключения t_r , время размыкания вы-

хода с входами при переключении t_{OPEN} , статическая P_{SUP}^S и динамическая P_{SUP}^D потребляемые мощности. Электрические схемы, использованные для тестирования этих характеристик, изображены на рис.1. Исследовались несколько типов 8-ми и 16-ти канальных мультиплексоров, изготовленных по КМОП и HCMOS технологиям. Это были микросхемы серии КР561 (КМОП)–КР2, серии КР1561 (КМОП)–КР2, КР3, серии КР590 (КМОП)–КН6 (все–производства СНГ), серии С4000 (КМОП)–НСF4051BE (фирма SGS-Semiconductor Corp.), серии 74НС (HCMOS)–РС74НС4067 (фирма Valvo).

3 Эксперимент и обсуждение

Результаты измерений представлены в таблицах 1–4 и на рис.4. В таблице 1 приведены результаты измерения сопротивления включенного канала R_{ON} и согласования каналов ΔR_{ON} . Как показано в таблице, при понижении температуры до 4,2 К величины R_{ON} и ΔR_{ON} у микросхем серии КР561 увеличивается в несколько раз, тогда как для серии КР1561 – в $1 \div 1,5$ раза. Три из четырех микросхем серии КР590 и одна из двух микросхем НCF4051BE не работали в жидком гелии. R_{ON} и ΔR_{ON} микросхем серии РС74НС4067 уменьшились почти в 2 раза. При пониженном напряжении питания (табл.2) значения R_{ON} и ΔR_{ON} увеличиваются в $2 \div 3$ раза.

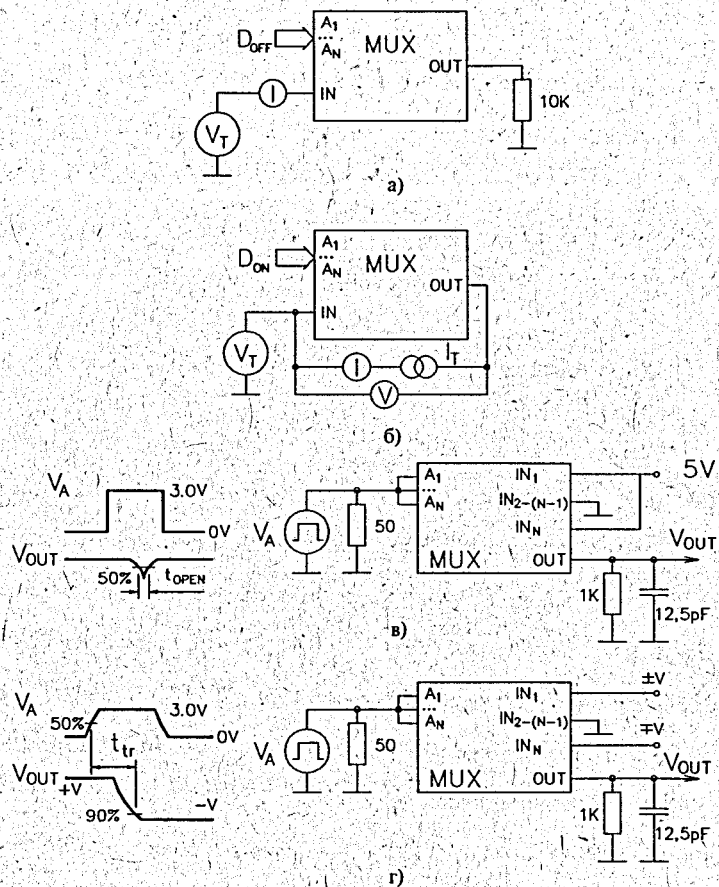


Рис. 1: Тестирующая схема для исследования а) сопротивления открытого канала $R_{ON}(V_T)$ и согласования каналов ΔR_{ON} ; б) тока утечки I_L ; в) время размыкания выхода со входом при переключении t_{OPEN} ; г) задержки включения t_{tr} .

Таблица 1. Сопротивление открытого канала $R_{ON}(V_T = 0,5$ напряжения питания) и согласование каналов ΔR_{ON} мультиплексов при криогенных температурах и напряжении питания 15 В (6 В для PC74HC4067)

Мультиплексор	Кол-во	$R_{ON}, \text{ Ом}$		$\Delta R_{ON}, \text{ Ом}$	
		293 К	4,2К	293К	4,2К
КР561КП2	3	250 – 370	800 – 1200	50 – 60	200 – 500
КР1561КП2	3	180 – 250	190 – 360	20 – 35	25 – 50
КР1561КП3	4	160 – 200	130 – 250	20 – 40	20 – 40
КР590КН6	4	250 – 330	1500 – ∞	20 – 30	300 – ∞
НСF4051BE	2	430 – 550	2500 – ∞	45 – 90	450 – ∞
PC74HC4067	4	60 – 80	35 – 50	10 – 15	5 – 10

Таблица 2. Сопротивление открытого канала $R_{ON}(V_T = 0,5$ напряжения питания) и согласование каналов ΔR_{ON} мультиплексов при криогенных температурах и напряжении питания 5 В (3 В для PC74HC4067)

Мультиплексор	Кол-во	$R_{ON}, \text{ Ом}$		$\Delta R_{ON}, \text{ Ом}$	
		293 К	4,2К	293К	4,2К
КР561КП2	3	560 – 1250	1800 – 2600	150 – 220	350 – 730
КР1561КП2	3	320 – 640	450 – 810	60 – 75	55 – 85
КР1561КП3	4	300 – 620	370 – 760	40 – 55	40 – 65
НСF4051BE	2	1300 – 2100	3400 – ∞	250 – 600	530 – ∞
PC74HC4067	4	100 – 120	50 – 70	15 – 20	10 – 15

В таблице 3 приведены результаты исследований статической и динамической потребляемых мощностей P_{SUP}^S и P_{SUP}^D и тока утечки закрытого канала I_L . Ток утечки закрытого канала резко снижается вследствие уменьшения числа неосновных носителей. Потребляемая мощность в статическом режиме P_{SUP}^S снижается при охлаждении. Это объясняется, видимо, снижением токов утечки затворов и тока утечки через закрытый канал. Динамическая потребляемая мощность P_{SUP}^D , в основном определяемая потерями

на перезаряд входных ёмкостей транзисторов через сопротивление открытого канала, определяется изменением R_{ON} . Для микросхем серий КР561, КР590 и CD4000 она увеличивается, тогда как для КР1561 практически не изменяется, а для 74НС уменьшается. При снижении напряжения питания P_{SUP}^S уменьшается, а P_{SUP}^D увеличивается вследствие ухудшения временных характеристик.

Таблица 3. Статическая и динамическая потребляемые мощности P_{SUP}^S и P_{SUP}^D и ток утечки закрытого канала I_L мультиплексоров при криогенных температурах и напряжении питания 15 В (6 В для РС74НС4067)

Мультиплексор	Кол-во	P_{SUP}^S , мкВт	P_{SUP}^D , мкВт	I_L , нА
		0 К, 4,2 К	100 кК, 4,2 К	4,2 К
КР561КП2	3	0,1 – 0,3	150 – 700	0,2 – 0,5
КР1561КП2	3	0,05 – 0,2	120 – 540	0,1 – 0,3
КР1561КП3	4	0,02 – 0,2	100 – 450	0,1 – 0,2
КР590КН6	4	2	3500	0,05
НСF4051BE	2	0,3	950	0,6
РС74НС4067	4	0,02 – 0,1	10 – 25	0,1 – 0,2

Известно, что быстродействие в КМОП-И HCMOS-микросхемах определяется, в основном, временем перезаряда входной ёмкости комплементарной пары МОП транзисторов через сопротивление открытого канала транзистора. Исследования показали, что входные ёмкости микросхем меняются незначительно, видимо, потому что определяются в основном геометрическими параметрами транзисторов. Как результат, температурные зависимости времён задержек повторяют зависимость $R_{ON}(T)$ (табл.4).

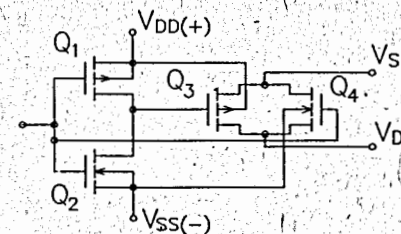


Рис. 2: Упрощённая схема КМОП-ключа. Q_1, Q_3 – р-канальные, Q_2, Q_4 – н-канальные транзисторы.

Таблица 4. Время переключения t_{tr} и время размыкания выхода с входами при переключении t_{OPEN} мультиплексоров при криогенных температурах и напряжении питания 15 В (6 В для РС74НС4067)

Мультиплексор	t_{tr} , мкс		t_{OPEN} , нс	
	293 К	4,2 К	293 К	4,2 К
КР561КП2	0,3	0,7	90	250
КР1561КП2	0,25	0,3	60	100
КР1561КП3	0,2	0,2	60	60
КР590КН6	0,3	0,9	100	300
НСF4051BE	0,5	2,5	100	350
РС74НС4067	0,015	< 0,01	—	—

Единичный КМОП-ключ или отдельный канал КМОП-мультиплексора обычно состоит из двух параллельно соединённых N- и P- канальных МОП полевых транзисторов (рис.2 [10]). Типичные зависимости сопротивлений открытых P-канального и N-канального транзисторов (R_{ON}^P и R_{ON}^N) от напряжения $V_T \approx V_S \approx V_D$ представлены на рис.3. Сопротивление ключа R_{ON} – это сопротивление двух параллельных резисторов R_{ON}^P и R_{ON}^N

$$R_{ON} = \frac{R_{ON}^N \cdot R_{ON}^P}{R_{ON}^N + R_{ON}^P} \quad (1)$$

Поскольку сопротивления R_{ON}^N и R_{ON}^P образованы каналами с разными типами проводимости, необходимо установить, не имеет ли особенностей за-

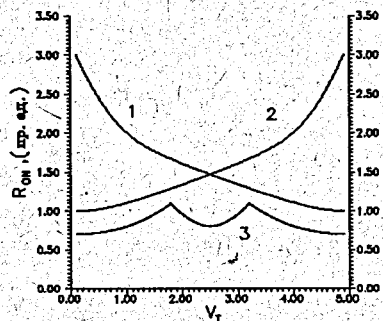


Рис. 3: Типичные зависимости $R_{ON}(V_T)$ полевых транзисторов. Напряжение питания мультимплексора 5 В.

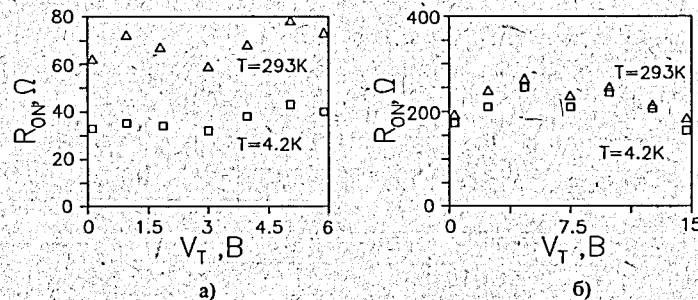


Рис. 4: Зависимости $R_{ON}(V_T)$ мультимплексоров: а) PC74HC4067 и б) KP1561KP3.

Зависимость $R_{ON}(V_T)$ при низких температурах. Для этих измерений использовалась тестирующая схема, изображённая на рис.1 а. Результаты измерений для мультимплексоров KP1561KP3 и PC74HC4067 приведены на рис.4. Из него видно, что, правильно выбрав режим работы мультимплексора, можно несколько уменьшить вносимую коммутатором погрешность.

Для создания холодного коммутатора необходимо было проверить работоспособность цифровых микросхем при низких температурах: двоичных счётчиков и триггеров Шмитта. Испытывались КМОП схемы счётчиков KP561IE10 и KP1561IE10 и аналоги 54HC (HCMOS) серии микросхемы

1564IE7 (счётчик) и 1564ТЛ2 (триггер Шмитта). При $T = 4,2$ К максимальная частота счёта микросхем KP561IE10 – снизилась в $1,5 \div 2$ раза, KP1561IE10 снизилась в $1 \div 1,5$ раза, временные характеристики микросхем серии 1564 улучшились.

Проверялась работоспособность мультимплексоров KP561KP2, KP1561KP2, KP1561KP3, PC74HC4067, триггера Шмитта K1564ТЛ2 и счётчиков KP561IE10, KP1561IE10, K1564IE7 при $T = 1,4$ К. Все испытанные микросхемы работали при этой температуре, их характеристики незначительно изменялись по сравнению с $T = 4,2$ К.

Все микросхемы серий 561, 1561 и 590 имели пластмассовые 16-выводные DIP корпуса, серии K1564 – металлокерамический планарный корпус, PC74HC4067 – 24-выводной мини-DIP корпус. Визуальный контроль с помощью оптического микроскопа не обнаружил появления каких-либо дефектов в корпусе после многократных термоциклирований от $T = 293$ К до $T = 1,4$ К со скоростью ≈ 5 К/с в диапазоне $T = 4,2 \div 293$ К.

4 Заключение

Как показал эксперимент, цифровые КМОП-мультимплексоры серий KP561 и KP1561 и микросхемы HCMOS-серий остаются работоспособными при $T = 1,4 \div 293$ К и могут быть использованы как элементы криоэлектронного оборудования. Лучшими характеристиками в криогенной области температур, среди исследованных, обладают микросхемы, выполненные по HCMOS-технологии, серий PC74HC и K1564. Эти микросхемы были выбраны в качестве элементной базы охлаждаемой части системы для многоточечных криогенных измерений [8, 9]. В то же время, аналоговые мультимплексоры

КР590КН6 и один цифровой HCF4051BE целесообразно использовать при низких температурах вследствие деградации характеристик.

Автор выражает признательность проф. Г. Клиппингу (Свободный университет, г. Берлин) за некоторые компоненты и И. А. Сергееву за помощь при проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда (грант RFG300).

Литература

- [1] *Fiszdon W., Peradzynski Z., Stamm G.* // Phys. Fluids A. 1989. V.1. N 5. P. 881.
- [2] *Petrac D., Spencer R.* // In: Cryogenics Processes and Equipment in Energy Systems. San Francisco, California, August 19-21, 1980.
- [3] *Peters J.* // In: Proceedings of the ICEC-11. West Berlin, Germany. April 1986. P.607-611.
- [4] *Szücs Z., Karunanithi R., Ruppert U.* // In: Proceedings of the Symposium on LOW TEMPERATURE ELECTRONICS AND HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY: The Electrochemical Society Proceedings Volume 88-9, Honolulu, USA. 1987. P.537-544.
- [5] *Reyneri L.M.* // Cryogenics. 1989. V.29. N 5. P.540-545.
- [6] *Rösger T., Reyneri L., Devit O.N.* // Cryogenics. 1987. V.27. N 1. P.12-14.
- [7] *Schöneberg U., Hosticka B.J., Fent J., Oberlack H., Zimmer G.* // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1989. V.24. N 3. P.718-722.

[8] *I.A.Sergeev, S.V.Uchaikin.* // In: Collected Abstract International Workshop on QUANTUM VORTICITY AND TURBULENCE IN HE II FLOWS. Göttingen, Germany, 4-6 November 1993.

[9] *Y.Filippov, I.Sergeev, S.Uchaikin.* // Cryogenics. 1994. V.34. ICEC-15 Supplement. P.413-415.

[10] *Wynne J.* // In: Applications reference manual. Analog Devices. 1993. P.12-27.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1996 года.