

Применение рефрижератора растворения в системе охлаждения твердотельного квантового процессора

Кубит (quantum bit) можно реализовать множеством способов: на основе фотонов, ионных ловушек, Джозефсоновского перехода (СКВИДов) и т.д. На фоне сильно развитой полупроводниковой индустрии использование последних (твердотельных) для производства квантовых вычислителей весьма привлекательно, так как в основе их производства лежат те же технологии, что и для обычного карманного устройства. Помимо создания систем управления квантовым вентилями, перед конструкторами стоит ещё одна задача – охлаждение данных устройств. Требованиями к такой установке выступают высокая продолжительность работы (цикличность), сверхнизкие температурные уровни ниже 1К, высокая холодопроизводительность. Идеальным кандидатом на роль такой установки является рефрижератор растворения.

За последние 5 лет вышло около 45 статей как-либо касающихся рефрижераторов растворения. Последняя самая значимая статья, вышедшая в декабре 2019 года, посвящена реализации рефрижератора растворения с возможностью масштабирования системы до 150 кубитов.

Изначально целью развития технологии было интегрирование квантового вычислителя в колонну рефрижератора растворения. Затем была сформулирована задача комбинирования твердотельного метода создания запутанных состояний с другими (например, ионного захвата). На данный момент решаются проблемы масштабирования числа кубитов и оптимизации отвода теплоты от управляющей системы.

Источниками информации о применении рефрижератора растворения являются учебники по криогенике, низким температурам, а также квантовым вычислениям как российских, так и зарубежных авторов; лекции TED, YouTube, статьи и публикации в журналах.

Рефрижератор растворения работает по принципу изменения концентрации ^3He в бинарной смеси с ^4He . Из-за разности их физических свойств при температуре ниже 700 μK смесь самопроизвольно расслаивается на богатую ^3He и богатую ^4He . При этом минимальная концентрация ^3He в ^4He составляет 6,4%. Если из такой смеси выпаривать и откачивать ^3He , который обладает теплотой парообразования почти в 2,5 раза меньше

чем ^4He , уменьшение концентрации ^3He в растворе вызовет его переход из концентрированного насыщенного состояния в состояние с меньшей концентрацией. Такой процесс требует затрат внутренней энергии, вследствие чего на границе раздела жидких фаз наблюдается снижение температуры. Холодопроизводительность процесса растворения зависит от температурного уровня и отличается от установки к установке, а необходимый объём ^3He можно вычислить, зная объём теплообменников и камер растворения и конденсации. Причём для успешной реализации процесса растворения достаточно 1–2 мм насыщенного слоя ^3He .

Практические примеры реализации рефрижераторов растворения показывают такие компании, как Oxford Instruments, BlueForce, Leiden Cryogenics, а их применение в системах твердотельных квантовых компьютеров: Rigetti, IBM, Honeywell, Google, Microsoft.

Список литературы:

1. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К
2. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник / [А. М. Архаров, И. А. Архаров, А. Н. Антонов и др.]; под общ. ред. А. М. Архарова и И. К. Буткевича. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 582, [2] с. ISBN 978-5-7038-3477-0
3. Petit, L., Eenink, H.G.J., Russ, M. *et al.* Universal quantum logic in hot silicon qubits. *Nature* 580, 355–359 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2170-7>
4. Yang, C.H., Leon, R.C.C., Hwang, J.C.C. *et al.* Operation of a silicon quantum processor unit cell above one kelvin. *Nature* 580, 350–354 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2171-6>
5. Krinner, S., Storz, S., Kurpiers, P. *et al.* Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems. *EPJ Quantum Technol.* 6, 2 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0>
6. <https://www.youtube.com/watch?v=7jT5rbE69ho>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=7susESgnDv8&pbjreload=101>