(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0098597
(43) 공개일자 2018년09월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 99/00 (2010.01) *G06F 13/40* (2006.01)
H01L 39/02 (2006.01) *H01L 39/22* (2006.01)
B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 99/002 (2013.01)
G06F 13/4027 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-7021117
(22) 출원일자(국제) 2016년12월20일
심사청구일자 2018년07월20일
(85) 번역문제출일자 2018년07월20일
(86) 국제출원번호 PCT/US2016/067827
(87) 국제공개번호 WO 2017/127205
국제공개일자 2017년07월27일
(30) 우선권주장
15/003,232 2016년01월21일 미국(US)

(71) 출원인
노스롭 그루먼 시스템즈 코포레이션
미국 버지니아주 22042-4511 폴스 처치 페어뷰 파크 드라이브 2980
(72) 발명자
나아만, 오퍼
미국 21043 메릴랜드, 엘리코트 시티, 마나한 드라이브 8691
킨, 재커리 카일
미국 21202 메릴랜드, 볼티모어 이1, 헌터 스트리스 아파트먼트 1011
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 정안

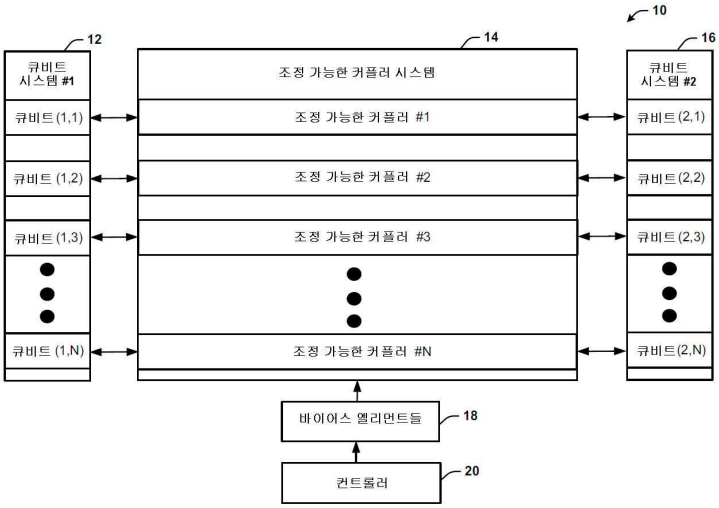
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **원격 큐비트들 사이의 조정 가능한 버스-매개 커플링**

(57) 요 약

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템이 제공된다. 상기 조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템은 제1공진기를 통해 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제1단부에 연결된 제1입력 포트와 제2공진기를 통해 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제2단부에 연결된 제2입력 포트를 포함한다. 상기 제1입력 포트는 제1큐비트에 커플링되도록 구성되고, 상기 제2입력 포트는 제2큐비트에 커플링되도록 구성된다. 컨트롤러는 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 고립(isolation)을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하도록 구성된다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G06F 13/4068 (2013.01)
H01L 39/025 (2013.01)
H01L 39/223 (2013.01)
B82Y 10/00 (2013.01)
(72) 발명자
스타우티모어, 마이카
미국 20895 메릴랜드, 켄싱턴 글렌웨이 드라이브 3313
퍼거슨, 데이비드 조지
미국 20912 메릴랜드, 타코마 파크, 롤리 애비뉴 7420

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1공진기를 통해 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제1단부에 연결된 제1입력 포트 - 상기 제1입력 포트는 제1큐비트에 커플링되도록 구성됨 -;

제2공진기를 통해 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제2단부에 연결된 제2입력 포트 - 상기 제2입력 포트는 제2큐비트에 커플링되도록 구성됨 -; 및

상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 고립(isolation)을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하도록 구성되는 컨트롤러를 포함하는,

조정 가능한 버스-매개(tunable bus-mediated) 커플링 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 N개의 조셉슨 정션(Josephson junction)들의 연속 어레이를 포함하고,

각각은 단일 조셉슨 정션보다 N배 큰 임계 전류를 가지는,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 조셉슨 정션인,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서,

제1단부에서 상기 제1공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제1종단 인덕터; 및

제1단부에서 상기 제2공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제2종단 인덕터를 더 포함하고,

상기 제1종단 인덕터, 상기 조셉슨 정션 및 상기 제2종단 인덕터는 RF-SQUID를 형성하는,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제1종단 인덕터와 상기 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되는 바이어스 인덕터를 더 포함하고,

상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양은 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링 강도를 제어하는,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 제1입력 포트와 상기 제1공진기 사이에 연결되는 제1커플링 커패시터; 및

상기 제2입력 포트와 상기 제2공진기 사이에 연결되는 제2커플링 커패시터를 더 포함하는,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 컨트롤러는 상기 제1종단 인덕터와 상기 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결된 상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양을 제어하는,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 컨트롤러는, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링을 가능하게 하는, 상기 RF-SQUID 내에서 순 플럭스(net flux)를 유도하지 않는 무전류(no current)와, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하는, 상기 RF-SQUID 내에서 약 $0.1\Phi_0$ 내지 약 $0.45\Phi_0$의 순 플럭스를 유도하는 전류 사이의 전류를 상기 바이어스 인덕터를 통해 제공하고,

여기서 Φ_0는 플럭스 양자와 동일한,

조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템.

청구항 9

제1큐비트를 포함하는 제1큐비트 시스템; 및

상기 제1큐비트 시스템과 떨어져 있고 제2큐비트를 포함하는 제2큐비트 시스템을 포함하고,

상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트는 제1항의 상기 조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템을 통해 커플링 가능한,

초전도 시스템.

청구항 10

제1큐비트를 포함하는 제1큐비트 시스템;

상기 제1큐비트 시스템과 떨어져 있고 제2큐비트를 포함하는 제2큐비트 시스템; 및

상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에 배치된 조정 가능한 버스-매개 커플러를 포함하고,

상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는 상기 제1큐비트를 상기 제2큐비트에 강하게(strongly) 커플링하기 위한 제1상태 및 상기 제1큐비트를 상기 제2큐비트에 대해 고립시키기 위한 제2상태를 가지는,

초전도 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는 상기 제1큐비트에 연결된 제1공진기와 상기 제2큐비트에 연결된 제2공진기 사이에 배치되는 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트를 포함하는,

초전도 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하도록 구성되는 컨트롤러를 더 포함하는,

초전도 시스템.

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 조셉슨 정션인,

초전도 시스템.

청구항 14

제13항에 있어서,

제1단부에서 상기 제1공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제1종단 인덕터; 및

제1단부에서 상기 제2공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제2종단 인덕터를 더 포함하고,

상기 제1종단 인덕터, 상기 조셉슨 정션 및 상기 제2종단 인덕터는 RF-SQUID를 형성하는,

초전도 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 제1종단 인덕터와 상기 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되는 바이어스 인덕터를 더 포함하고,

상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양은 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링 강도를 제어하는,

초전도 시스템.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 제1큐비트와 상기 제1공진기 사이에 연결되는 제1커플링 커패시터; 및

상기 제2큐비트와 상기 제2공진기 사이에 연결되는 제2커플링 커패시터를 더 포함하는,

초전도 시스템.

청구항 17

제15항에 있어서,

상기 컨트롤러는, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링을 가능하게 하는, 상기 RF-SQUID 내에서 순 플럭스(net flux)를 유도하지 않는 무전류(no current)와, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하는, 상기 RF-SQUID 내에서 약 $0.1\Phi_0$ 내지 약 $0.45\Phi_0$의 순 플럭스를 유도하는 전류 사이의 전류를 상기 바이어스 인덕터를 통해 제공하고,

여기서 Φ_0는 플럭스 양자와 동일한,

초전도 시스템.

청구항 18

초전도 시스템에 있어서,

제1큐비트를 포함하는 제1큐비트 시스템;

상기 제1큐비트 시스템과 떨어져 있고 제2큐비트를 포함하는 제2큐비트 시스템;

상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에 배치된 조정 가능한 버스-매개 커플러;

제1종단 인덕터와 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되는 바이어스 인덕터 - 상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양은 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링 강도를 제어함 -; 및

조셉슨 정션의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하기 위해 상기 제1종단 인덕터와 상기 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되는 상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양을 제어하는 컨트롤러를 포함하며,

상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는,

제1공진기를 통해 상기 조셉슨 정션의 제1단부에 연결된 제1입력 포트 - 상기 제1입력 포트는 상기 제1큐비트에 커플링됨 -;

제2공진기를 통해 상기 조셉슨 정션의 제2단부에 연결된 제2입력 포트 - 상기 제2입력 포트는 상기 제2큐비트에 커플링됨 -;

제1단부에서 상기 제1공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 상기 제1종단 인덕터; 및

제1단부에서 상기 제2공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 상기 제2종단 인덕터 - 상기 제1종단 인덕터, 상기 조셉슨 정션 및 상기 제2종단 인덕터는 RF-SQUID를 형성함 - 를 포함하는,

초전도 시스템.

청구항 19

제18항에 있어서,

상기 제1큐비트와 상기 제1공진기 사이에 연결되는 제1커플링 커패시터; 및

상기 제2큐비트와 상기 제2공진기 사이에 연결되는 제2커플링 커패시터를 더 포함하는,

초전도 시스템.

청구항 20

제18항에 있어서,

상기 컨트롤러는, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링을 가능하게 하는, 상기 RF-SQUID 내에서 순 플럭스(net flux)를 유도하지 않는 무전류(no current)와, 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하는, 상기 RF-SQUID 내에서 약 $0.1\Phi_0$ 내지 약 $0.45\Phi_0$의 순 플럭스를 유도하는 전류 사이의 전류를 상기 바이어스 인덕터를 통해 제공하고,

여기서 Φ_0는 플럭스 양자와 동일한,

초전도 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 일반적으로 초전도 회로들에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 원격 큐비트들 사이의 조정 가능한 버스-매개(bus-mediated) 커플링에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 본 출원은 2016년 1월 21일에 출원된 미국 특허출원 제15/003232호로부터의 우선권을 주장하며, 상기 미국 특허출원의 내용 전체가 참조로서 본 명세서에 포함된다.

[0003] 양자 계산 및 시뮬레이션에 대한 기본적인 과제는 다양한 연산들을 수행하기 위해 고도로 연결된(highly connected) 코히어런트(coherent) 큐비트들의 대-규모(large-scale) 시스템을 구성하는 것이다. 초전도 큐비트들은 양자 정보를 처리하기 위해 매크로스코픽(macroscopic) 회로들을 이용하며 이러한 목표를 향한 유망한 후보이다. 최근, 물질 연구(materials research)와 회로 최적화는 큐비트 코히어런스(coherence)에 있어서 상당한 진전을 가져오고 있다. 초전도 큐비트들은 이제 그들의 코히어런스 시간(coherence time) 내에 수백 번의 연산들을 수행할 수 있고, 에러 정정과 같은 복잡한 알고리즘들에 대한 연구를 가능하게 한다. 이러한 고-코히어런스 큐비트들과 조정 가능한(tunable) 큐비트-간(inter-qubit) 커플링을 결합하는 것이 코히어런트 로컬 연산들(coherent local operation)과 동적으로 변화하는 큐비트 인터랙션들(interactions)을 모두 가능하게 하기 때문에, 많은 애플리케이션들에서, 높은-코히어런스 큐비트들과 조정 가능한 큐비트-간 커플링을 결합하는 것이 바람직하다. 양자 계산에 대해서, 이는 단일-큐비트 게이트들에 대한 고립(isolation)을 제공하는 반면에 동시에 디코히어런스(decoherence)으로 인한 오류들을 최소화하는 빠른 2-큐비트 게이트들을 가능하게 한다. 조정 가능한 커플링에서의 이전의 시도들에도 불구하고, 고 코히어런스 디바이스들과 조정 가능한, 장거리(long-distance) 커플링을 통합시키는 과제로 인해 이러한 애플리케이션들은 아직 실현되지 않았다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0004] 본 발명의 실시 예들에 따른 조정 가능한 버스-매개(bus-mediated) 커플링 시스템이 제공된다. 상기 조정 가능한 버스-매개 커플링 시스템은 제1공진기를 통해 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제1단부에 연결된 제1입력 포트와 제2공진기를 통해 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 제2단부에 연결된 제2입력 포트를 포함한다. 상기 제1입력 포트는 제1큐비트에 커플링되도록 구성되고, 상기 제2입력 포트는 제2큐비트에 커플링되도록 구성된다. 컨트롤러는 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에서 고립(isolation)을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하도록 구성된다.

[0005] 본 발명의 실시 예들에 따른 초전도 시스템이 제공된다. 상기 초전도 시스템은 제1큐비트를 포함하는 제1큐비트 시스템, 상기 제1큐비트 시스템과 떨어져 있고 제2큐비트를 포함하는 제2큐비트 시스템을 포함한다. 조정 가능한 버스-매개 커플러는 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에 배치된다. 상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는 상기 제1큐비트를 상기 제2큐비트에 강하게(strongly) 커플링하기 위한 제1상태 및 상기 제1큐비트를 상기 제2큐비트에 대해 고립시키기 위한 제2상태를 가진다.

[0006] 본 발명의 실시 예들에 따른 초전도 시스템이 제공된다. 상기 초전도 시스템은 제1큐비트를 포함하는 제1큐비트 시스템, 상기 제1큐비트 시스템과 떨어져 있고 제2큐비트를 포함하는 제2큐비트 시스템 및 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이에 배치된 조정 가능한 버스-매개 커플러를 포함한다. 상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는 제1공진기를 통해 조셉슨 정션의 제1단부에 연결된 제1입력 포트와 제2공진기를 통해 상기 조셉슨 정션의 제2단부에 연결된 제2입력 포트를 포함한다. 상기 제1입력 포트는 상기 제1큐비트에 커플링되고 상기 제2입력 포트는 상기 제2큐비트에 커플링된다. 상기 조정 가능한 버스-매개 커플러는 제1단부에서 상기 제1공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제1종단 인덕터와, 제1단부에서 상기 제2공진기와 상기 조셉슨 정션 사이에 연결되고 제2단부에서 접지에 연결되는 제2종단 인덕터를 포함하고, 상기 제1종단 인덕터, 상기 조셉슨 정션 및 상기 제2종단 인덕터는 RF-SQUID를 형성한다. 바이어스 인덕터는 상기 제1종단 인덕터와 상기 제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되고, 상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양은 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 커플링 강도를 제어한다. 컨트롤러는 상기 조셉슨 정션의 인덕턴스를 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 강한 커플링을 제공하기 위한 낮은 인덕턴스 상태와 상기 제1큐비트와 상기 제2큐비트 사이의 고립을 제공하기 위한 높은 인덕턴스 상태 사이에서 제어하기 위해 상기 제1종단 인덕터와 상기

제2종단 인덕터 중 어느 하나에 유도적으로 연결되는 상기 바이어스 인덕터를 통한 전류의 양을 제어한다.

도면의 간단한 설명

[0007] 도 1은 초전도 시스템의 일례의 블록 다이어그램을 나타낸다.

도 2는 도 1에서 사용될 수 있는 조정 가능한 버스-매개 커플러의 일례의 도면을 나타낸다.

도 3은 진동의 짝수 모드(점선)와 홀수 모드(실선)를 나타내는 결합된 결합-공진기 시스템의 길이에 따른 전압의 그래프를 나타낸다.

도 4는 주파수-분할 짝수 모드와 홀수 모드를 생성하는 도 2의 하이브리드된 좌측 공진기와 우측 공진기를 나타내는 도식적인 레벨 다이어그램이다.

도 5는 특정 플럭스 설정에 대한 시뮬레이션의 결과를 나타내는 그래픽 도표이다.

도 6은 플럭스-의존 커플링으로 인한 짝수 버스 모드와 홀수 버스 모드의 주파수 분할을 나타내는 그래픽 도표이다.

도 7은 버스 모드 분할과 큐비트-큐비트 버스-매개 커플링의 의존성을 정션 플럭스-의존적 임계 전류의 함수로서 나타내는 시뮬레이션 결과들의 그래프를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0008] 본 개시는 일반적으로 초전도 회로들, 보다 상세하게는 원격 큐비트들(remote qubits) 사이의 조정 가능한 버스-매개(tunable bus-mediated) 커플링 (또는 커플러(coupler))에 관한 것이다. 일례에서, 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 별도의 원격 초전도 시스템들에 있을 수 있는 두 개의 큐비트들 사이에 배치된다. 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 큐비트들 사이의 강하게 커플링된 상태와 디커플링된 상태(또는 고립 상태)사이에서 조절될 수 있고 게다가 이들 상태들 사이의 중간(intermediate) 커플링 강도들의 여러 상태들 사이에서 조절될 수 있다. 이런 방식으로, 디커플링된 상태에서 고립된 큐비트들의 상태 정보에 대해서 조작(manipulation)이 수행될 수 있는 반면, 상기 상태 정보는 강하게 커플링된 상태 동안 큐비트들 사이에서 교환될 수 있다. 게다가, 상태 정보는 큐비트들 사이의 중간 커플링 강도 상태에서 발생(originating) 큐비트의 상태 정보의 파괴 없이 조작될 수 있고 큐비트들 사이로 통과될 수 있다. 일례에서, 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 조셉슨 정션(Josephson junction)일 수 있다. 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 단일 조셉슨 정션으로서 배치될 수 있거나 또는 각각이 원래의 조셉슨 정션보다 N배 큰 임계 전류를 가지는 N개의 조셉슨 정션들의 연속하는 어레이로서 배치될 수 있다.

[0009] 또 다른 예에서, RF-SQUID 조정 가능한 커플러는 반-파(half-wave) 공진기 버스의 중간에 임베딩되는(embedded) 조셉슨 정션을 포함한다. 상기 RF-SQUID는 커플링을 위한 큐비트들 사이의 버스-매개 분산(dispersive) 인터랙션을 가능하게 한다. 버스-매개 커플링의 장점은 큐비트들이 물리적으로 서로 떨어져 배치 – 예컨대, 양자 프로세서 칩 상의 분리된 회로 블록들에 배치 – 될 수 있다는 것이다. 필요시 본질적으로 턴 오프될 수 있는, 조정 가능한 커플러의 장점은 주파수 과밀(crowding) 및 큐비트들 사이의 원하지 않는 잔류 인터랙션들(residual interactions)에서의 감소이다. 게다가, 인터랙션 강도는 제조 공정 상의 변동성을 보상하기 위해 현장에서(in the field) 조정(calibrate)될 수 있고 트리밍(trim)될 수 있으며 계산 프로토콜의 일부로서 실시간으로 제어될 수 있다.

[0010] 조셉슨 정션은 SQUID 내에 전류가 존재하지 않거나 또는 낮은 전류가 유도될 때 제1인덕턴스를 가질 수 있고, 플럭스 – 예컨대, 약 $0.1\Phi_0$보다 크고 약 $0.45\Phi_0$보다 작은 플럭스, Φ_0는 플럭스 양자와 동일함 – 를 생성하거나 또는 유도하는 미리 결정된 임계치의 전류 또는 더 높은 전류가 각각의 SQUID 내에서 유도될 때 제2인덕턴스를 가질 수 있다. 상기 제1인덕턴스(예컨대, $\hbar/(2e)*1/I_C$, $\hbar$는 플랑크 상수를 2π로 나눈 것이고, e는 전자의 전하량이고 I_C는 조셉슨 정션의 임계 전류)는 제1큐비트와 제2큐비트 사이의 커플링을 제공할 수 있다. 상기 제2인덕턴스(예컨대, 큰 인덕턴스 값)은 제1큐비트와 제2큐비트 사이의 디커플링을 제공할 수 있다.

[0011] 도 1은 초전도 시스템(10)의 일례의 블록 다이어그램을 나타낸다. 초전도 시스템은 조정 가능한 커플러 시스템(14)을 통해 제2큐비트 시스템(16)에 커플링된 제1큐비트 시스템(12)을 포함한다. (X,N)가 큐비트 시스템을 나타내는 X를 제공하고 N(N은 1 이상의 정수)이 상기 큐비트 시스템 내에서의 큐비트 번호를 나타내도록, 제1큐비트 시스템(12)은 큐비트 (1,1) 내지 큐비트 (1,N)으로 라벨링된(labeled) 복수의 큐비트들을 포함하고, 제2큐비

트 시스템(16)은 큐비트 (2,1) 내지 큐비트 (2,N)으로 라벨링된 복수의 큐비트들을 포함한다. 제1큐비트 시스템(12)과 제2큐비트 시스템(16)은 서로 다른 게이트 연산들, 에러 정정 연산들, 메모리 연산들 또는 임의의 다양한 다른 초전도 연산들과 같은 서로 다른 논리 연산들을 수행하는 분리된(separate) 논리 블록들일 수 있다. 제1큐비트 시스템(12)과 제2큐비트 시스템(16)은 또한 다른 큐비트 시스템 내의 큐비트들과 커플링되지 않는 다양한 추가적인 큐비트들과 다른 초전도 엘리먼트를 포함할 수 있으나, 다양한 큐비트 및 다른 초전도 연산들을 수행하기 위해 각각의 시스템에 있는 다른 큐비트들과 커플링될 수 있다.

[0012] 제1큐비트 시스템(12)의 각 큐비트는 조정 가능한 커플러 #1 내지 조정 가능한 커플러 #N으로 라벨링된 N개의 조정 가능한 커플러들을 포함하는 조정 가능한 커플러 시스템(14)의 각 조정 가능한 커플러에 의해 제2큐비트 시스템(16)의 각 큐비트와 커플링될 수 있다. 각 조정 가능한 커플러는 서로 대향하는 큐비트 시스템들(12와 16)의 두 개의 독립 큐비트들 사이의 커플링 강도의 제어를 각각 허용하기 위해 조절될 수 있는 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트를 포함한다. 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 조정 가능한 버스-매개 커플러를 통한 두 개의 독립 큐비트들의 원격 커플링을 허용하기 위해 두 개의 공진기들 사이에 배치될 수 있다. 일례에서, 상기 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트는 두 개의 공진기들 사이에 배치된 RF-SQUID 내에 있는 조셉슨 정션일 수 있다. 초전도 스위칭 시스템(10)은 또한 스위치 컨트롤러(20)와 바이어스 엘리먼트들(18)을 포함한다. 가변 인덕턴스 커플링 엘리먼트들은 서로 대향하는 큐비트 시스템들(12와 16) 내의 각각의 독립 큐비트들을 커플링하기 위해, 디커플하기 위해 그리고 이들 사이의 커플링 강도를 제어하기 위해 바이어스 엘리먼트들(18)과 스위치 컨트롤러(20)를 통해 자기 플럭스(magnetic flux)에 의해 제어될 수 있다.

[0013] 도 2는 도 1에서 사용될 수 있는 조정 가능한 버스-매개 커플러(30)의 일례의 도면을 나타낸다. 조정 가능한 버스-매개 커플러(30)는 제1사분-파(quarter-wave) 전송 라인 공진기(TL1)와 제2사분-파 전송 라인 공진기(TL2)로 구성된다. 제1커플링 커패시터(C1)는 제1포트(Port 1)를 제1사분-파 전송 라인 공진기(TL1)의 제1단부에 연결하고, 제2커플링 커패시터(C2)는 제2포트(Port 2)를 제2사분-파 전송 라인 공진기(TL2)의 제1단부에 연결한다. 제1포트(Port 1)는 제1큐비트에 커플링될 수 있고, 제2포트(Port 2)는 제2큐비트에 커플링될 수 있다. 제1사분-파 전송 라인 공진기(TL1)의 제2단부는 제1종단 인덕터(L1)를 통해 접지(ground)에 쇼트(short)되고, 제2사분-파 전송 라인 공진기(TL2)의 제2단부는 제2종단 인덕터(L2)를 통해 접지에 쇼트된다. 종단 인덕터들(L1와 L2)과 함께 조셉슨 정션(J1)이 RF-SQUID(32)를 형성하도록 조셉슨 정션(J1)은 추가적으로 종단 인덕터들(L1와 L2) 사이에 연결된다.

[0014] RF-SQUID(32)는, 바이어스 인덕턴스(L3)를 통해 제3포트(Port 3)와 제4포트(Port 4) 사이를 흐르는 전류에 의해 유도된 상호 인덕턴스(M)를 통해 RF-SQUID 루프 내에서 유도된 자기 플럭스(Φ_e)에 의해 제어되는, 가변 변환기로서 기능한다. RF-SQUID(32)내의 선형 인덕턴스들(L1와 L2)에 대한 조셉슨 정션(J1)의 비에 의해 결정되는 바와 같이, RF-SQUID(32)내에 둘러싸인(enclosed) 플럭스, Φ_e, 가 $\Phi_0/2$의 상당한(appreciable) 부분일 때, 공진기들(TL1와 TL2) 사이의 유효 상호 커플링은 본질적으로 0이다. 둘러싸인 플럭스가 Φ_0의 정수 배 또는 0에 근접할 때, 두 공진기들(TL1와 TL2) 사이의 유효 상호 커플링은 상당하고, $M_{eff}=L_1*L_2/(L_{J1}+L_1+L_2)$와 동일하다. $\Phi_0/2$의 둘러싸인 플럭스에 근접하면, 유효 상호 커플링은 상당하고 네거티브(negative)이다. 그러므로, 두 개의 공진기들(TL1와 TL2) 사이의 유효 상호 커플링($M_{eff}(\Phi_e)$)은 인가된 플럭스의 함수이다. 플럭스는 제1포트(Port 1) 및 제2포트(Port 2)와 각각 커플링되는 제1큐비트와 제2큐비트 사이의 유효 커플링의 변화하는 강도들을 제공하기 위해 바이어스 인덕턴스(L3)를 통한 전류를 변화시킴으로써 0과 $\Phi_0/2$ 사이에서 가변될 수 있다.

[0015] 도 3은 진동의 짝수 모드(점선)와 홀수 모드(실선)를 나타내는 도 2의 결합된 결합-공진기(coupled-resonator)의 길이에 따른 전압의 그래프(40)를 나타낸다. 두 개의 전송 라인 공진기들(TL1와 TL2) 사이의 커플링으로 인해, 결합된 시스템은 서로 다른 주파수들을 가지는 두 개의 진동 고유(eigen)-모드들을 제공한다. 제1홀수 모드는 전송 라인들의 단부들에서의 전압들이 180도의 위상차로 진동하는 결합된 시스템의 반-파 주파수에 근접한 주파수(Ω_0)를 가지고, 짝수 모드는 상기 전송 라인들의 단부들에서의 전압들이 동일한 위상으로 진동하는 다른 주파수(Ω_e)를 가진다. 커플링이 포지티브(positive)일 때, 짝수 모드 주파수는 홀수 모드 주파수보다 크다. 커플링이 네거티브일 때, 짝수 모드 주파수는 홀수 모드 주파수보다 낮다. 어느 경우에나 짝수 모드와 홀수 모드는 주파수를 유효 상호 커플링($M_{eff}(\Phi_e)$)에 비례하여 $2g_c$의 양만큼 주파수에서 분할된다.

[0016] 도 2의 커패시터들(C1와 C2)을 통해 결합-공진기 버스의 두 개의 포트들에 연결된 큐비트들 각각은 상기 버스의 짝수 모드와 홀수 모드 모두와 인터랙션한다. 이러한 분산적 체제에서, 큐비트 주파수들이 버스 주파수들로부터

충분히 디튜닝(detune)될 때, 큐비트들 사이의 유효 버스-매개 인터랙션이 존재한다. 그러나, 짝수 모드로 인한 매개 인터랙션의 부호(sign)가 홀수 모드로 인한 매개 인터랙션의 부호와 반대이고, 그러므로 총 유효 매개 커플링은 두 버스 모드들로 인한 커플링의 평형(balance)으로서 결정될 수 있다. 특히, 두 개의 기여들(contributions)은 동일한 크기와 서로 반대인 부호로 만들어질 수 있고, 커플링의 소거(cancellation)를 가져온다. 도 4는 도식적인 레벨 다이어그램(50)이며, 주파수-분할 짝수 모드와 홀수 모드를 생산하는 하이브리드된 좌측 공진기와 우측 공진기를 나타내며, 좌측 큐비트와 우측 큐비트 각각은 홀수 모드로부터 각 디튜닝($\Delta_{Lo,Ro}$)에 있고, 짝수 모드로부터 각 디튜닝($\Delta_{Le,Re}$)에 있다.

[0017] 디튜닝의 함수로서 분산적 체제의 큐비트들 사이의 전체적인 버스-매개 커플링, g_{eff}, 는 다음과 같이 주어진다:

수학식 1

[0018] $$g_{eff} = \frac{g_L g_R}{2}\left(\frac{1}{\Delta_{Le}} + \frac{1}{\Delta_{Re}} - \frac{1}{\Delta_{Lo}} - \frac{1}{\Delta_{Ro}}\right)$$

[0019] 여기서, g_L과 g_R은 도 2의 커패시터들(C1와 C2)을 통한 각 공진기들에 대한 큐비트의 고정된 커플링 강도들이다. $\Delta_{Le}=\Delta_{Re}=\Delta_e$ 이고 $\Delta_{Lo}=\Delta_{Ro}=\Delta_o$가 되도록 두 개의 큐비트들의 주파수들이 동일할 때, 유효 버스-매개 큐비트-큐비트 커플링에 대한 표현은 아래와 같이 단순화될 수 있다:

수학식 2

[0020] $$g_{eff} = g_L g_R\left(\frac{2g_c}{\Delta_e \Delta_o}\right)$$

[0021] 여기서, g_{eff}는 g_c를 통해, 그리고, 암시적으로(implicitly), Δ_e와 Δ_o를 통해 – g_c, Δ_e 및 Δ_o 모두는 플럭스-의존적임 – 플럭스(Φ_e)에 의존한다.

[0022] 에질런트(AgileInt)의 ADS(Advanced Design Simulation) 툴 시뮬레이션은 공칭(nominal) 무-전류 조셉슨 인덕턴스로부터 50배 큰 값까지 변화되는 값을 가지는 선형 인덕터로 근사되는 정션에 대하여 수행되었다. 특정 플럭스 설정에 대한 시뮬레이션의 결과는 유효 인터랙션(g_{eff})으로 인한 큐비트 스펙트럼에서의 분할을 나타내는 도 5의 패널(60) 및 플럭스-의존 커플링(g_c)으로 인한 짝수 버스 모드와 홀수 버스 모드의 주파수 분할을 나타내는 도 6의 패널(70)에서 보여진다. 상기 시뮬레이션들은 g_{eff}의 g_c에 대한 함수적 의존성을 확인하고, 조셉슨 정션의 플럭스-조정 가능한 인덕턴스에 대한 g_c의 예상된 의존성을 확인하였다..

[0023] 도 7은 버스 모드 분할(g_c)과 큐비트-큐비트 버스-매개 커플링(g_{eff})의 의존성을 큐비트-버스 주파수 디튜닝의 특정 값에 대한 정션 플럭스-의존적 임계 전류의 함수로서 나타내는 시뮬레이션 결과들의 그래프(80)를 나타낸다. 도시된 예들에서, 버스 주파수가 큐비트 주파수들 보다 높으나, 버스 주파수가 큐비트 주파수들보다 낮을 때에도 동일한 작용(behavior)이 되풀이(replicate)될 수 있다.

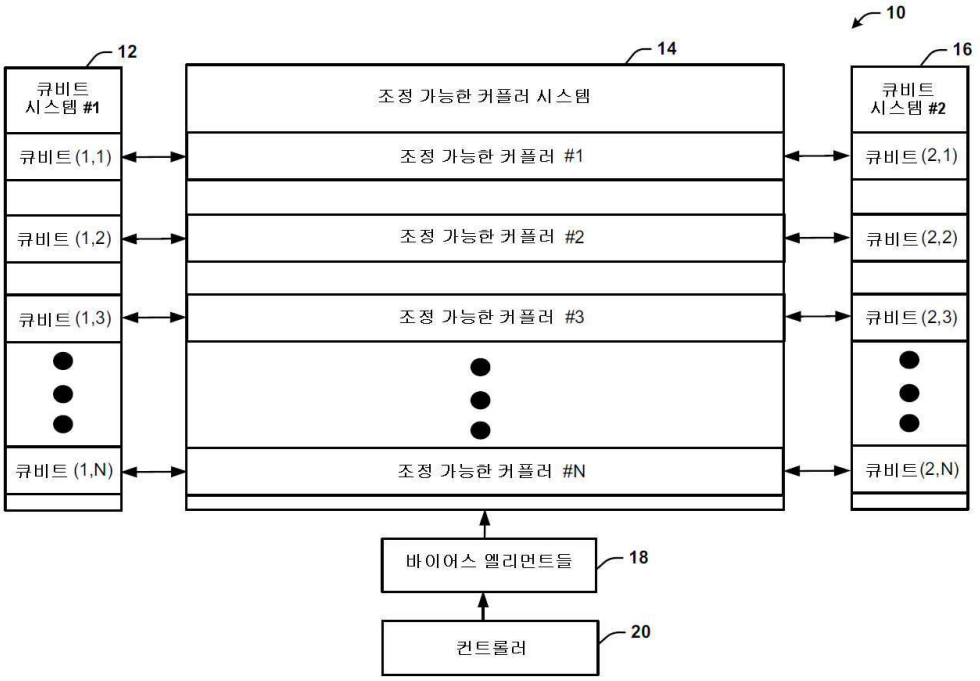
[0024] 요약하자면, 결합된 시스템이 반대 부호들로 매개 큐비트-큐비트 인터랙션에 기여하는 두 가지 모드들을 가지는 양자 버스를 형성하도록, RF-SQUID 조정 가능한 커플러는 두 개의 사분-파 공진기들 사이에 임베딩된다. 그리하여 큐비트들 사이의 총 유효 인터랙션은 두 개의 버스 모드들로부터의 매개 커플링에 대한 기여들 사이의 평형으로서 플럭스로 조정 가능하다. 필요시 본질적으로 턴 오프될 수 있는, 조정 가능한 커플링의 장점은 주파수 과밀 및 큐비트들 사이의 원하지 않는 잔류 인터랙션들에서의 감소이다. 게다가, 인터랙션 강도는 제조 공정 상의 변동성을 보상하기 위해 현장에서 조정될 수 있고 트리밍될 수 있으며 계산 프로토콜의 일부로서 실시간으로 제어될 수 있다.

[0025] 위에서 설명된 것들은 본 발명의 예시들이다. 물론, 본 발명을 설명하기 위해 컴포넌트들 또는 방법들의 모든 생각할 수 있는 조합을 설명하는 것은 불가능하나, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 많은 추가적인 조합들과 치환들이 가능하다는 것을 인식할 것이다. 이에 따라, 본 발명은 첨부된 청구범

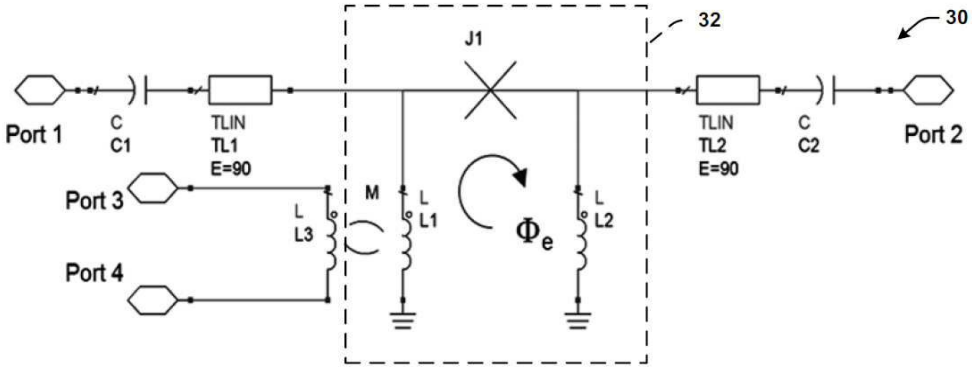
위를 포함하는 이 출원의 범위에 속하는 모든 그러한 변화들, 변경들 및 변형들을 포함하는 것으로 의도된다.

도면

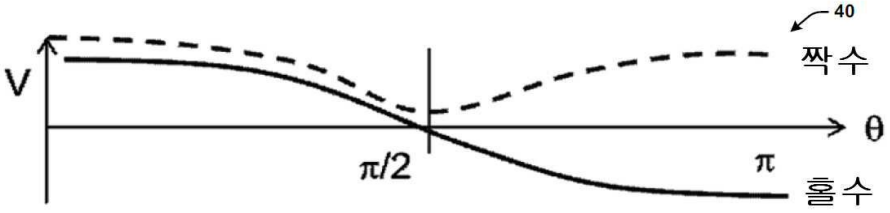
도면1



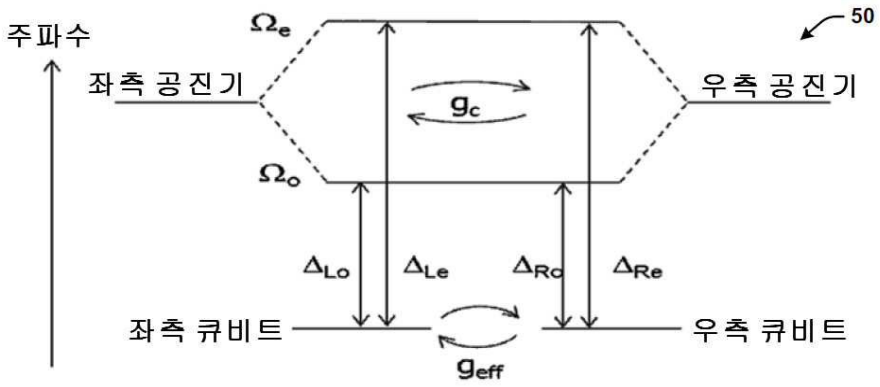
도면2



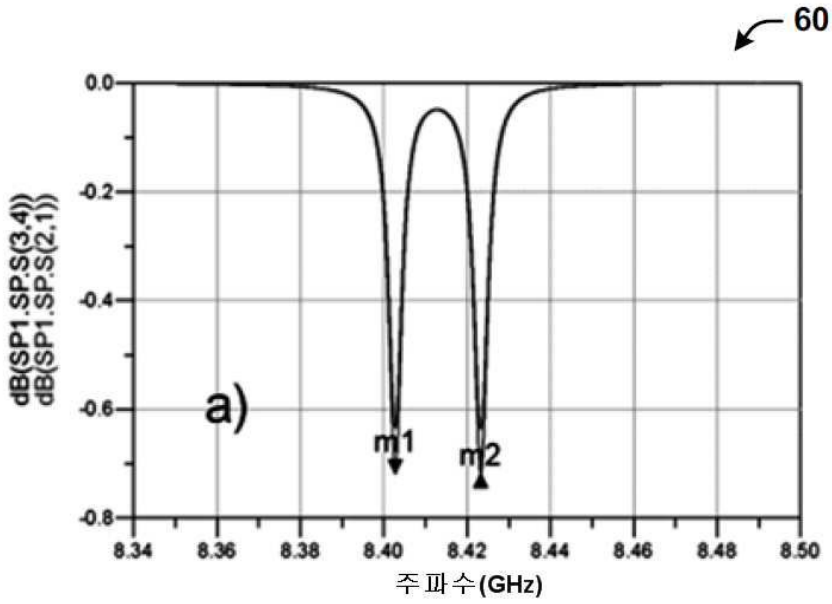
도면3



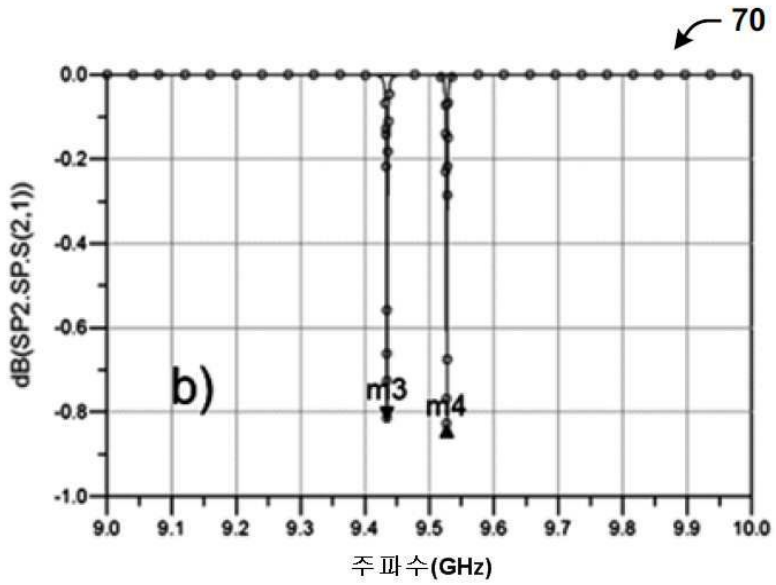
도면4



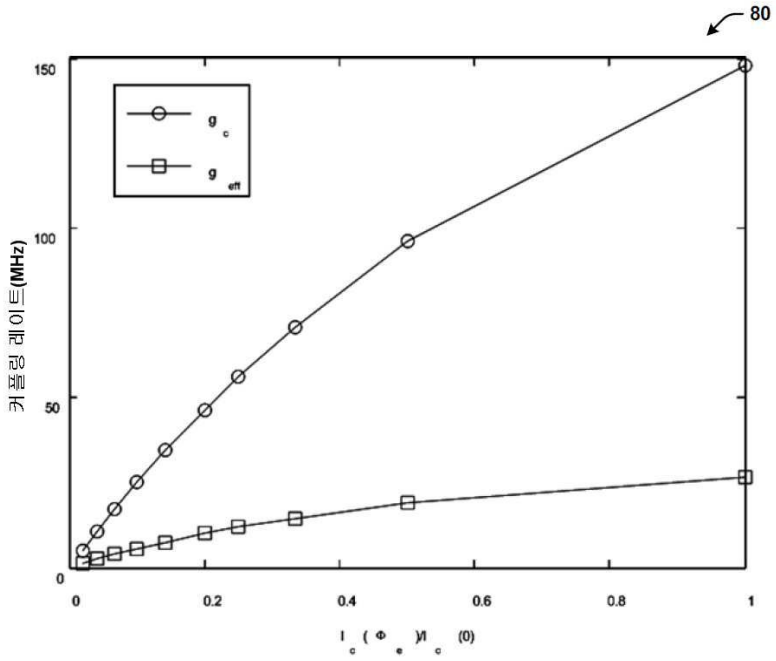
도면5



도면6


70
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
dB(SP2.SP.S(2,1))
b)
m3
m4
9.0
9.1
9.2
9.3
9.4
9.5
9.6
9.7
9.8
9.9
10.0
주파수(GHz)

도면7


80
150
100
50
0
커플링 레이트(MHz)
g c
g eff
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
I c (Φ e)/I c (0)