

Kapasiivinen yhden elektronin transistori

Keksintö on herkkä mittalaite, jonka pääsovellusala on kvanttilaskenta, erityisesti suprajohtavista mikro- ja nanorakenteista koostuvien kvanttibittien mittaaminen.

5

Kvanttilaskenta ja kvanttibitit

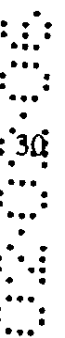
Kun digitaalielektroniikan perusyksikkö bitti on binäärilogiikan takia aina arvoltaan 0 tai 1, kvanttilaskennan perusyksikkö kvanttibitti voi olla mielivaltainen yhdistelmä eli superpositio arvoista 0 ja 1. Matemaattisesti kvanttibitin tila ilmaistaan lausekkeella $a|0\rangle + b|1\rangle$, jossa a ja b ovat yhtälön $|a|^2 + |b|^2 = 1$ toteuttavia kompleksilukuja, ja jossa kvanttitilat $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ vastaavat tavallisen bitin arvoja 0 ja 1.

10

15

Todellista kvanttietokonetta ei toistaiseksi ole toteutettu tai rakennettu, vaikkakin alaa tutkitaan useiden eri tieteenalojen näkökulmasta. Viime vuosina voimakkaasti kasvaneen kiinnostuksen selittää halu aikaansaada vallankumous digitaalisessa tietojenkäsittelyssä. Klassisen periaatteen mukainen tietokone toimii kiinteiden syöttötietojen perusteella, kun taas kvanttietokone käyttää hyväkseen kvanttimekaniikan superpositioperiaatetta, ja laskee yhdellä operaatiolla rinnakkaislaskentana kaikkien mahdollisten syöttötietojen erilaiset yhdistelmät. Tällä tavalla kvanttietokone pystyy suorittamaan työläitä laskuja, jotka ovat mahdottomia kuinka nopeille tahansa tavallisille tietokoneille. Näitä ovat muun muassa suuren luvun tekijöihinjako, jonka vaikeuteen perustuu modernin yhteiskunnan tietoturva, sekä kvanttimekaanisten systeemien simulointi, joka avaa huimia mahdollisuuksia esimerkiksi elämän perusteiden ja sairauksien synnyn tutkimuksessa.

20



Laskentavaiheiden jälkeen kvanttibittien kvanttitila mitataan.

Mittaustapahtumassa kvanttibitin kvanttitila romahtaa kvanttimekaniikan periaatteiden mukaisesti superpositiotilasta $a|0\rangle + b|1\rangle$ joko perustilaan $|0\rangle$ tai perustilaan $|1\rangle$. Esitetyn keksinnön kiinnostavin sovellutus on sen tarjoama mahdollisuus mitata tietyntyyppisiä kvanttibittejä nopeasti ja tarkasti.

30

Kvanttibittien tilan mittaaminen suprajohtavassa nanorakenteissa on osoittautunut ainakin yhtä vaikeaksi kuin niiden käyttäminen laskentaoperaatioihin.

5 Suprajohteessa elektronit esiintyvät niin sanottuina Cooperin pareina, jotka ovat kahden elektronin löysästi sidoksissa olevia koherentteja eli samaan tahtiin värähteleviä pareja. Cooperin parien supravirta kulkee ilman energian häviöitä, mikä on oleellista kvanttibitin koherenssin ylläpidossa. Suprajohtava virta voi lisäksi kulkea noin 1-2 nanometriä paksun eristeen lävitse

10 kvanttimekaanisen tunnelointi-ilmiön ansiosta. Tätä rakennetta kutsutaan tunneliliitokseksi. Tunneloituvan supravirran energiaa kuvaa termi Josephsonin energia E_J , joka on sitä suurempi, mitä voimakkaampi tunneloituva virta on. Jos Cooperin pari tuodaan suunnilleen mikrometrin suuruiselle suprajohtesaarekkeelle, tehty työ, jota kuvaa termi Cooperin parin varausenergia E_{CP} , voi riittävän alhaisessa lämpötilassa olla suurempi kuin termisten värähtelyjen energia. Suoraviivaisilla jäähdytysmenetelmillä, kuten laimennusjäähdyttimellä, saavutettavissa selvästi alle yhden Kelvinin suuruisissa lämpötiloissa E_{CP} ja E_J ovat suurimmat energiat ja täten niihin liittyvät ilmiöt hallitsevat fysikaalisissa prosesseissa.

20 Vaihekvanttibitti on eräs suprajohtava kvanttibitti. Suprajohtavasta materiaalista valmistettuun virtasilmukkaan indusoitu supravirta jatkaa kulkuaan silmukassa periaatteessa miten pitkään tahansa. Vaihekvanttibitin perustilat $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ liittyvät tunneliliitoksia sisältävässä, suprajohtavassa silmukassa kiertävän virran suuntaan. Vaihekvanttibittiä karakterisoi yleensä ehto $E_{CP} \ll E_J$. Vaihe Φ piirikomponentin yli määritellään jännitteen V aikaintegraalina yhtälöllä:

$$\phi = \frac{2e}{\hbar} \int_0^t dt' V(t') \quad (1)$$

jossa e on elektronin varaus, ja \hbar on Planckin vakio. Vaihe ja virta I ovat sidoksissa toisiinsa induktanssin L kautta, $\Phi = 2\pi/\Phi_0 LI$, jossa Φ_0 on

magneettivuon perusyksikkö, ja näinollen vaiheen mittaus ilmaisee virran / suunnan eli kvanttibitin tilan.

5 Toinen suprajohtava kvanttibitti on varauskvanttibitti, jonka tapauksessa $E_{CP} \approx E_J$. Nanomittakaavaisella tunneliliitoksella voi olla riittävästi Cooperin parin varausenergiaa, jotta tämä ehto täyttyy. Varauskvanttibitin tilat $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ vastaavat sitä, onko yhden tai useamman tunneliliitoksen määrittämällä suprajohdesaarekkeella nolla vai yksi Cooperin pareja varausneutraaliin tilanteeseen nähden. Varauskvanttibitin tilan mittaamista varten tarvitaan

10 herkkä sähkövarauksen mittalaite eli elektrometri, kuten rf-SET- tai L-SET.

Kenties kaikkein kiinnostavin suprajohtava kvanttibitti on varausvaihekvanttibitti. Kuten varauskvanttibitissä, kvanttibitin laskentaoperaatiot suoritetaan varaussignaaleilla. Mittaus puolestaan suoritetaan periaatteessa

15 samalla tavalla kuin vaihekvanttibitissä, eli mittaamalla vaihe kvanttibitin yli, sillä tiloihin $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ liittyy eri vaihe. Mittausta varten kvanttibitti on alkuperäisessä toteutuksessa oikosuljettu suprajohtavalla silmukalla, jossa on yksi suurikokoinen tunneliliitos. Mittaus on tehty siten, että rakenteeseen johdetaan virtapulssi. Riippuen kvanttibitin tilasta, suurikokoisen

20 tunneliliitoksen virta joko ylittää tai ei ylitä kriittisen arvon, jolloin rakenteen yli syntyy tai ei synny jännite. Tämä jännite on lopullinen suure, joka kertoo varaus-vaihekvanttibitin tilan alkuperäisen ratkaisun mukaisessa mittausmenetelmässä.

Kaikkien edellä mainittujen kvanttibittien toiminta on osoitettu kokeellisesti yksittäisinä kvanttilogiikkaelementteinä. Kaksi varauskvanttibittia on äskettäin jopa onnistuttu kytkemään yhteen ja näin aikaansaatu hyvin alkeellinen kvanttietokoneen prosessori.

Yhden elektronin transistori eli SET

Mesoskooppisiksi sanotaan yleensä ilmiöitä, jotka tapahtuvat alle yhden mikrometrin mittakaavassa. Yksittäisten atomien koko, muutama Ångströmiä, on tästä vielä useita kertaluokkia pienempi. Mesoskooppisissa sähköä

johtavissa metalli- tai puolijohderakenteissa voidaan kuitenkin havaita kvanttimekaanisia ilmiöitä matalissa lämpötiloissa. Suprajohtavien metallirakenteiden tapauksessa liikutaan alle yhden Kelvin-asteen alapuolella. Karkeasti ilmaistuna mesoskooppisuutta voidaan käyttää sanan nano synonyyminä.

5

Mesoskooppinen peruslaite on yhden elektronin transistori (SET), joka koostuu kahdesta tunneliliitoksesta, joiden poikkipinta-ala on noin 10000 neliönanometriä. Näiden tunneliliitosten summakapasitanssi, jota merkitään symbolilla C_{Σ} , on suuruudeltaan femtofaradin luokkaa. Jos Cooperin parin varausenergia, $E_{CP} = (2e)^2/2C_{\Sigma}$, on paljon suurempi lämpötilaa eli $E_{CP} \gg k_B T$, SET toimii herkimpänä tunnettuna sähkövarauksen ilmaisimena. Sen varausherkkyyden on osoitettu olevan $10^{-6} e/\sqrt{\text{Hz}}$ luokkaa, jolloin yksi miljoonasosa elektronin varauksesta voidaan mitata yhden sekunnin kuluessa.

10

15

Korkeataajuiset SET:t

Jotta SET-ilmaisimen suurta kaistanleveyttä noin 10 GHz voitaisiin hyödyntää, on kehitetty kaksi tekniikkaa, joissa SET luetaan siihen kytketyistä makroskooppisista komponenteista rakennetulla LC-oskillaattorilla.

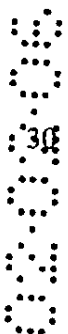
20

Radiotaajuinen yhden elektronin transistori (rf-SET) perustuu ei-suprajohtavan SET:n resistanssin riippuvuuteen mitattavasta varauksesta. Resistanssin muutos moduloi oskillaattorin Q-arvoa. Rf-SET on ollut ainoa laite, jolla on pystytty havainnoimaan varausten liikettä reaaliajassa megahertsien taajuusalueella. Tämä on tärkeää varauskvanttibittien karakterisoinnin ja mittaamisen kannalta.



Rf-SET:n dissipatiivisen luonteen aiheuttamien rajoitusten takia vastikään on kehitetty ei-dissipatiivinen L-SET (Induktiivinen SET) -tekniikka.

Tasavirtabiasjännitteen puuttumisen vuoksi suprajohtavan SET:n (SSET) energiatasot muodostavat energiavöitä (Kuva 2). Alimmalla vyöllä energian määrä kasvaa neliöllisesti vaiheen Φ funktiona siirryttäessä minimienergian pisteestä $\Phi = 0$ jompaankumpaan suuntaan. Tämän tyyppinen riippuvuus on ominaista induktanssille. Lisäksi SSET:ssä induktanssin arvo riippuu SSET:n



30

hilavarauksesta Q_g . L-SET:n toiminta perustuu siihen, että SSET:n ja LC-piirin muodostaman oskillaattorin resonanssitaajuus riippuu Q_g :stä. Tällä tavalla on periaatteessa mahdollista suorittaa varauksen mittausta reaktiivisesti eli ilman energian häviöitä ja haitallista kohinaa.

5

Vaihevarauskvanttibitti on esitelty yhdysvaltalaisessa patenttihakemuksessa US2003207766 A1. Suprajohtavan virran säätämiseen ja mittaamiseen tarkoitetun laitteen ratkaisu on puolestaan esitetty yhdysvaltalaisessa patenttijulkaisussa US 6 353 330 B1.

10

Keksinnön kohteena on detektori, ilmaisin (C-SET), yhtälön (1) mukaisesti määritellylle fysikaaliselle suurelle vaihe. C-SETin pääsovellus on kvanttibitin luku ja lukulaitteena toimiminen.

15

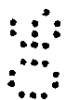
Huomattavan herkkyuden lisäksi C-SET:n oleellinen etu on, että siinä ei ole sisäistä energian häviöitä eikä sisäisiä kohinalähteitä. Tämä merkitsee sitä, että C-SET häiritsee mitattavaa kvanttisysteemiä vain vähäisesti, ja siten soveltuu heikkojen kvanttimekaanisten ilmiöiden kartoittamiseen ja hyödyntämiseen. Laitte voidaan myöskin valmistaa nykyisiä vaihemittareita useita suuruusluokkia pienemmäksi kooltaan, mikä mahdollistaa suuren tarkkuuden ja integrointitiheyden.

20



Keksinnön toimintaa selostetaan jäljempänä viittaamalla oheisiin piirustuksiin, joissa:

- Kuva 1 esittää C-SET-laitteiston konfiguraatiota, jossa SSET on kytketty hilan kautta erityiseen resonanssipiiriin (a) konfiguraatio, ja (b) ekvivalentti konfiguraatio, jossa SSET käyttäytyy kapasitanssin C_G tavoin;
- Kuva 2 esittää suprajohtavan yhden elektronin transistorin (SSET) energiavöitä;
- Kuva 3 esittää kuvan 2 mukaisessa kytkennässä kapasitanssin riippuvuutta vaiheesta Φ siten, että kukin käyrä vastaa merkittävää suhteen E_J/E_{CP} arvoa;
- Kuva 4 esittää varausvaihekvanttibitin mittaustajustusta.



30



C-SET

SSET:n energia kasvaa neliöllisesti myös toisen ulkoisen parametrin, hilavarauksen Q_g funktiona pisteen $Q_g = 0$ ympärillä. Näin ollen SSET käyttäytyy kapasitanssin C_G tavoin hilajännitteeseen $V_g = Q_g/C_g$ nähden. Lisäksi kapasitanssin arvo riippuu vaiheesta SSET:n ylitse. C-SET – konfiguraatio luodaan kytkemällä SSET hilan kautta erityiseen resonanssiin (Kuva 1). Kytkenänsä ideana on, että koko piirin resonanssitaajuus riippuu SSET:n kapasitanssista, joka puolestaan riippuu vaiheesta. Näin ollen kytkentä on nopea ja herkkä vaiheilmaisoin. C-SET:n periaatetta voidaan pitää käänteisenä L-SET:n kanssa. L-SET:ssä mitataan vaiheen kautta hilavarauksesta riippuvaa induktanssia, kun taas C-SET:ssä mitataan hilan kautta kapasitanssin riippuvuutta vaiheesta.

Kvanttibittien mittaaminen C-SET:n avulla

C-SET:ia voidaan käyttää erityisesti mitattaessa varaus-vaihekvanttibitteja tai vaihekvanttibitteja sekä mitä tahansa kuviteltavissa olevaa kvantti-informaatiovarastoa, joka voidaan mitata vaiheen avulla.

Esimerkiksi varaus-vaihekvanttibitin mittaaminen voidaan tehdä seuraavasti käyttäen C-SET:ia. Kvanttibitti ja C-SET kytketään rinnakkain suprajohdettavalla silmukalla. C-SET:n rakenne valitaan siten, että $E_J/E_{CP} \sim 1$, jolloin kapasitanssin vaiheriippuvuus on voimakas koko alueella $\Phi = 0 - \pi$ (Kuva 3, käyrä "1"). Myös kvanttibitille valitaan $E_J/E_{CP} \sim 1$ kuten varaus-vaihekvanttibitin mittaamisen alkuperäisessä toteutuksessa, mikä johtaa siihen, että tiloihin $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ liittyy vastakkaisiin suuntiin kiertävä supravirta silmukassa.

Kvanttibittia säädetään kahdella säätimellä (Kuva 4): lähellä olevan pienen johtavan silmukan läpi kulkeva sähkövirta synnyttää magneettikentän, joka vaikuttaa silmukassa kulkevaan virtaan, ja siten vaiheeseen kvanttibitin yli. Lisäksi kvanttibitillä on kapasitiivisesti kytketty hila, jolla asetetaan sopiva toimintapiste, sekä tehdään kvanttilaskentaan liittyvät korkeataajuiset operaatiot. Myös C-SET-detektorin kuuluvalla SSET:illä on vastaava hila.

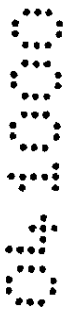
Kun kvanttilaskenta on käynnissä, vaihe sekä kvanttibitin että SSET:in yli on nolla. Jotta saataisiin signaali, joka erottaa kvanttibitin tilat $|0\rangle$ ja $|1\rangle$ ja toisistaan, vaiheen arvoa on muutettava nollasta. Tällöin tapahtuu kvanttimekaniikan mukainen kvanttibitin kvanttitiilan romahtaminen superpositiosta jompaankumpaan perustilaan. Mittaus tapahtuu seuraavanlaisella magneettikentän pulssien ja hilajännitepulssien yhdistelmällä. Kvanttibitin normeerattu hilavaraus $n_g = C_g V_g / (2e)$ muutetaan nopeasti arvosta 1 arvoon noin 0.37. Sitten silmukan läpäisevä magneettivuokasvatetaan arvosta 0 suunnilleen arvoon $0.5 \Phi_0$. C-SET- detektoriin kuuluvan SSET:n hilajännite pidetään koko ajan arvossa 0. Kvanttibitin tilasta riippuen vaihe SSET:n yli päättyy operaatioiden jälkeen joko arvoon 0 (neliö kuvassa 3) tai arvoon noin -2 (ympyrä kuvassa 3). Tämä vastaa SSET:n kapasitanssin eroa 0.4 fF tavallisilla parametriarvoilla $C_0 = 0,15$ pF, $Q = 20$, $f_0 = 1$ GHz, $C_g = 2$ fF, ja signaali-kohinasuhdetta 1 noin 2.5 MHz kaistanleveydellä, jos käytetään tavallista esivahvistinta, jonka kohinalämpötila on noin 3 Kelviniä. Jos käytettäisiin SQUID-esivahvistinta, jonka kohinalämpötila voi olla 0.1 Kelviniä, signaali-kohinasuhde 1 saavutettaisiin jopa 75 MHz kaistalla. Yllä olemme olettaneet, että laite on rakennettu alumiinista. Voimakkaampia suprajohteita, kuten niobia, käytettäessä kaistanleveydet olisivat suurempia. Kvanttibitin tilan mittaus C-SET-detektorilla on siis signaali-kohinasuhteen puolesta mahdollista nopeammin kuin 0.4 mikrosekunnissa käyttäen tavallisiakin esivahvistimia. Tämä aika on selvästi lyhempi kuin aika, jonka kuluessa mitattu tila hajoaa, joten mittaus on mahdollinen.

Vaiheen mittaus yleensä

C-SET:ä voidaan käyttää myös yleisesti missä tahansa sovelluksessa vaiheen mittalaitteena. Paitsi virtaan, vaihe liittyy läheisesti myös magneettivuohon $\Phi_m = \Phi \Phi_0 / (2 \pi)$. Näin ollen C-SET on myös herkkä magneettikentän mittalaite. Magneettikenttää mitattaessa suhde E_J / E_{CP} pitäisi olla mahdollisimman suuri, jolloin saavutetaan se, että kapasitanssi riippuu vaiheesta voimakkaasti. Alumiinista rakennetulle C-SET:lle pitää kuitenkin olla $E_J / E_{CP} < 10$, jotta E_{CP}

5 olisi vielä lämpötilaa suurempi. Tällä arvolla (Kuva 3, käyrä "10") saadaan magneettivuherkkyys $10^{-5} \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$, joka on samaa suuruusluokkaa kuin perinteisillä RF-SQUID:iin perustuvilla mittalaitteilla. C-SET:n energiahäviöt ovat kuitenkin useita suuruusluokkia pienemmät, ja laitteen koko voidaan pienentää periaatteessa jopa muutamien atomien kokoiseksi, mikä sallii suunnattoman spatiaalisen mittatarkkuuden.

Keksintö voi vaihdella jäljempänä esitettyjen patenttivaatimusten puitteissa.



Patenttivaatimukset:

1. Mittauskytkentä vaiheen määrittämiseen käyttäen mittauslaitteena yhden elektronin transistoria, **tunnettu** siitä että vaiheen mittaus suoritetaan mittaamalla yhden elektronin transistorin kapasitanssi hilan ja maan välillä.
2. Vaatimuksen 1. mukainen mittauskytkentä kvanttibitin tilan määrittämiseen käyttäen mittauslaitteena yhden elektronin transistoria, **tunnettu** siitä että
 - mitattava kvanttibitti on sellaista tyyppiä että sen tila voidaan määrittää vaiheen mittauksen kautta ja
 - vaiheen mittaus suoritetaan mittaamalla yhden elektronin transistorin kapasitanssi hilan ja maan välillä.
3. Jonkin vaatimuksen 1. tai 2. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että mitattava kvanttibitti on varaus-vaihekvanttibitti.
4. Jonkin vaatimuksen 1. - 3. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että transistorin yksi Josephson-liitos (100) on yhdistetty johtimella (101) kvanttibitin yhteen Josephson-liitokseen (102) ja transistorin toinen Josephson-liitos (103) on yhdistetty toisella johtimella (104) kvanttibitin toiseen Josephson-liitokseen (105), sekä lisäksi mainitut johtimet on kumpikin kytketty maahan siten että maahankytkeä on toteutettu kapasitanssin (106 ja 107) kautta.
5. Jonkin vaatimuksen 1. – 4. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että transistorin hila on kytketty resonanssipiiriin, joka koostuu ohjausjännitteeseen (108) kytketystä induktanssista (109) sekä maahan kytketystä kondensaattorista (110).
6. Jonkin vaatimuksen 1. – 5. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että sen avulla mitattua resonanssitaajuutta käytetään yhden elektronin transistorin kapasitanssin määrittämiseen.
7. Jonkin vaatimuksen 1. – 6. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että kytkennän läheisyyteen on asennettu virtasilmutta tai muu laite, jolla mittauskytkentään voidaan kohdistaa magneettivoima mittauksen alkuunpanemiseksi.

8. Jonkin vaatimuksen 1. – 7. mukainen mittauskytkentä, **tunnettu** siitä että vaihe mitataan rekisteröimällä resonanssipiirin ulompaan kytkentäpisteeseen kohdistetun jänniteaallon heijastuma.



Patentkrav

- 5
1. Mätkoppling för bestämning av fasen genom att som mätinstrument använda en en-elektrontransistor, **kännetecknad därav att** fasen bestämmes genom mätning av kapacitansen mellan gaten och jorden i en en-elektrontransistor.
- 10
2. En mätkoppling enligt av krav 1 för att bestämma kvantbitens tillstånd med hjälp av en en-elektrontransistor, **kännetecknad därav att**
 - den kvantbit som skall mätas är av en sådan art att dess tillstånd kan bestämmas genom en mätning av fasen, och
 - fasmätningen sker genom mätning av kapacitansen mellan gaten och jorden på en-elektrontransistorn.
- 15
3. En mätkoppling enligt något av kraven 1 eller 2, **kännetecknad därav att** den kvantbit som skall mätas är en laddnings-faskvantbit.
- 20
4. En mätkoppling enligt något av kraven 1 – 3, **kännetecknad därav att** transistorns ena Josephson-kontakt (100) är genom en ledning (101) sammankopplad med kvantbitens ena Josephson-kontakt (102) och transistorns andra Josephson-kontakt (103) är sammankopplad med en annan ledning (104) med kvantbitens andra Josephson-kontakt (105) samt att nämnda bägge ledningar är kopplade till jorden sålunda att jordkopplingen är kapacitiv (106 och 107).
- 25
5. En mätkoppling enligt något av kraven 1 – 4, **kännetecknad därav att** transistorns gaten är kopplad till en resonanskrets som består av en induktans (109) kopplad till styrspänningen (108) samt en kondensator (110) som kopplats till jorden.
- 30
6. En mätkoppling enligt något av kraven 1 – 5, **kännetecknad därav att** den uppmätta resonansfrekvensen användes för att bestämma en en-elektrontransistors kapacitans.

7. En mätkoppling enligt något av kraven 1 – 6, **kännetecknad därav att** i närheten av kopplingen placerats en strömkrets eller någon annan apparat med vilken man kan åstadkomma en ett magnetflöde som initierar mätningen.

5

8. En mätkoppling enligt något av kraven 1 – 7, **kännetecknad därav att** fasen mätes genom registrering av reflektionen av den spänningsväg som reflekteras från den yttre kopplingspunkten på resonanskretsen.



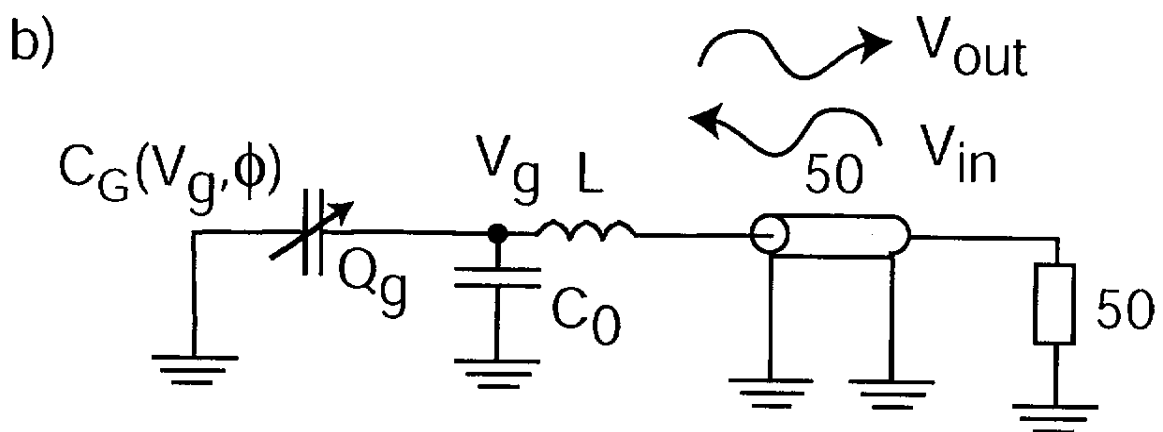
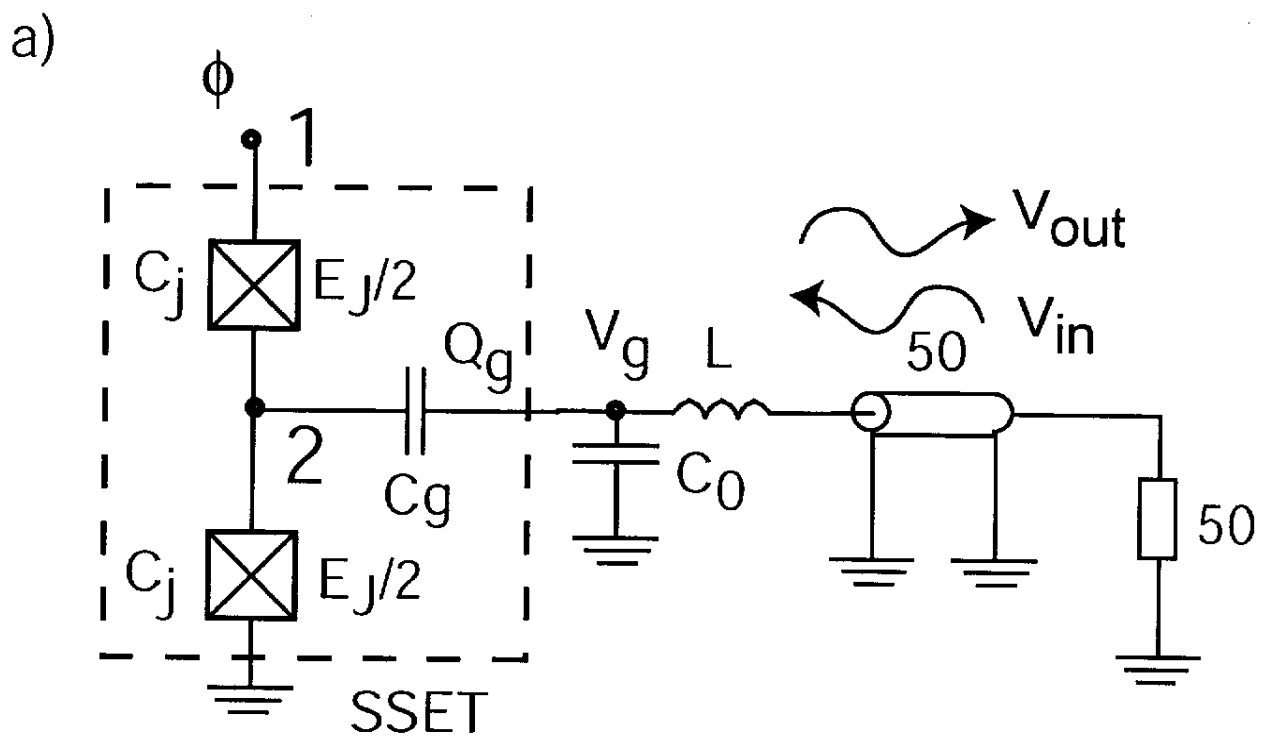


FIG. 1

117032

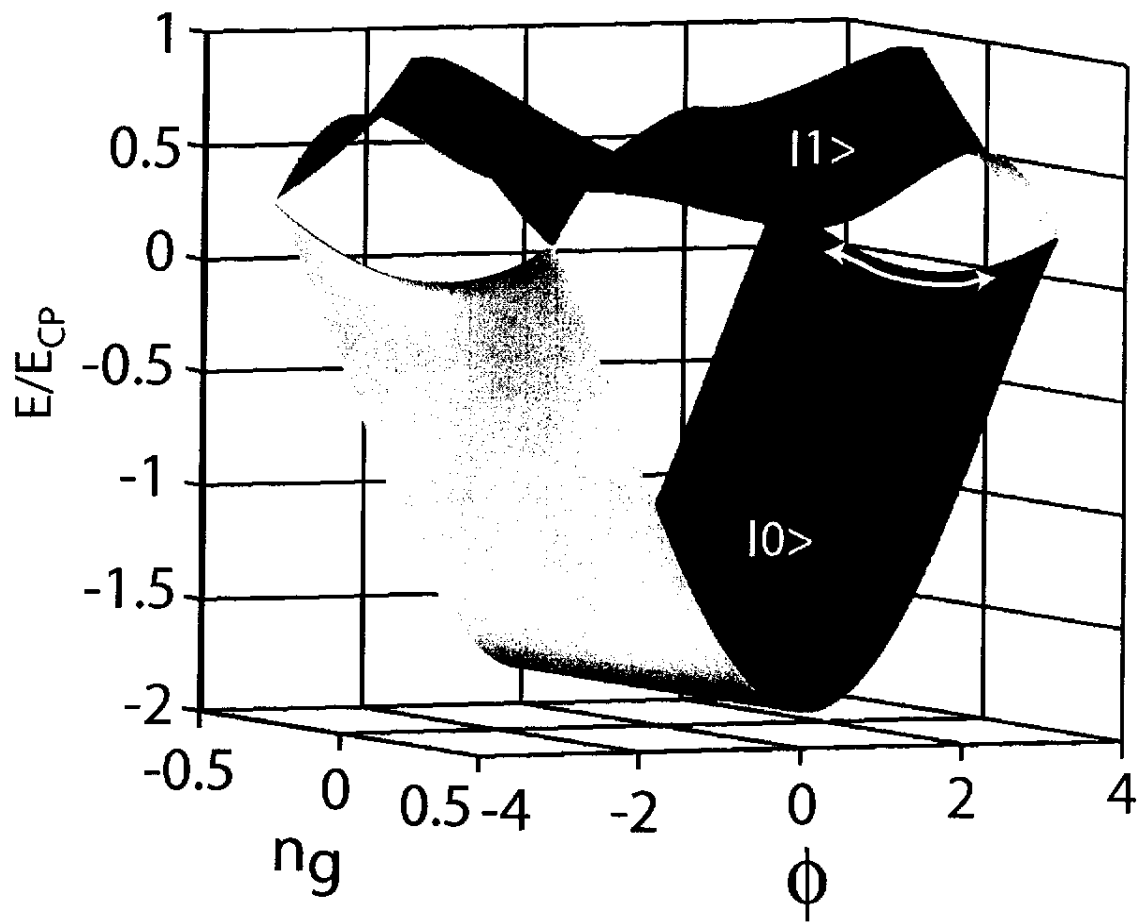


FIG. 2

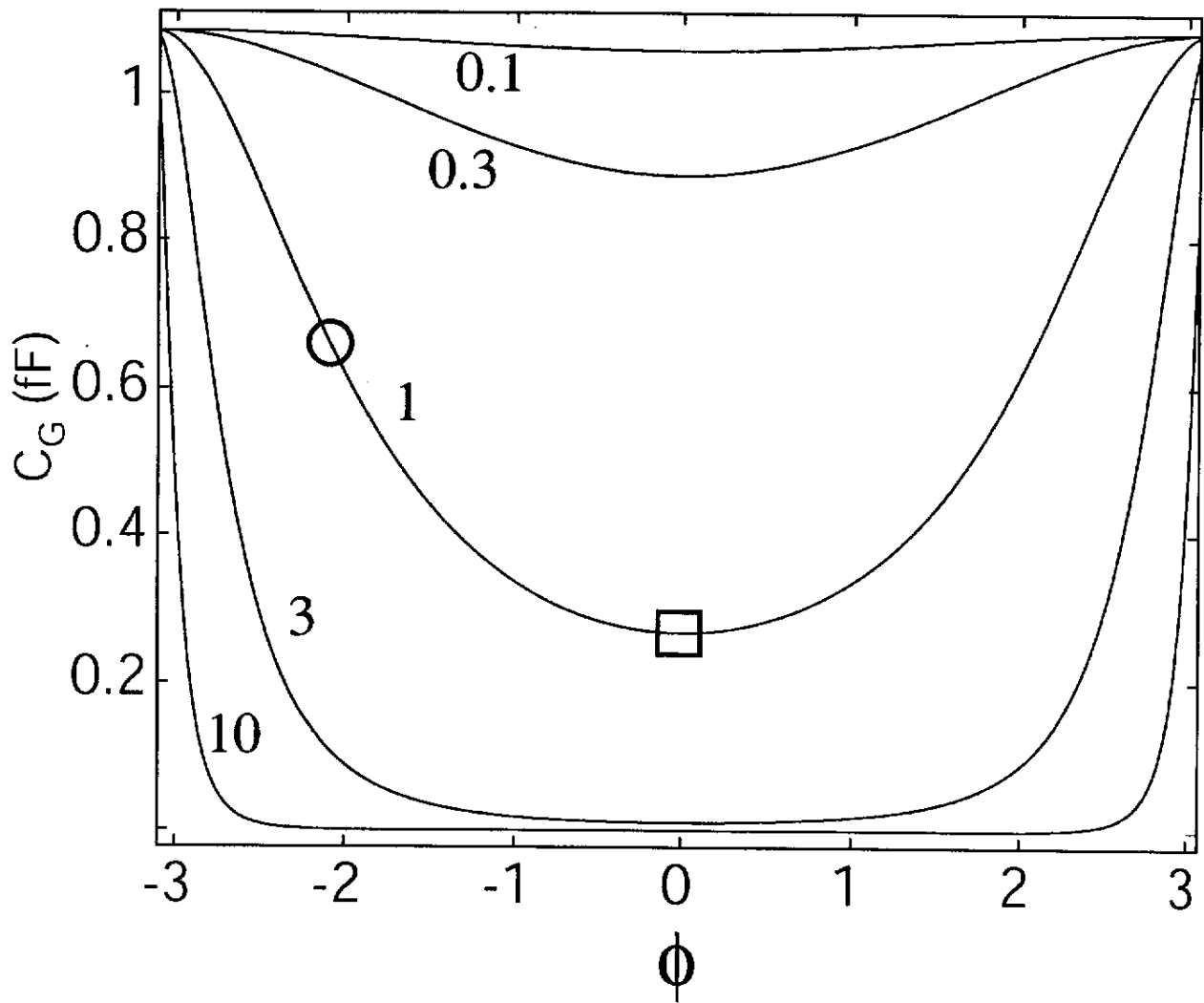


FIG. 3

