پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی مدار شارژپمپ در تکنولوژی CMOS

زهرا رستگاری

استاد راهنما : دکتر هومن نبوتی

شهریور ۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

تقدیم به همسر مهربانم که در جهت رسیدن به کمال انسانی و پیمودن راه علم و معرفت همواره در کنارم بوده و هست.

تشکر و قدردانی:

با سپاس از خدای رحمان که اراده کرد تا من زیبا بیاموزم.

با تشکر فراوان از

استاد بزرگوار جناب آقای دکتر نبوتی

تمامی اساتید بخش الکترونیک دانشکده برق مؤسسه آموزش عالی سجاد

همسر عزیز و خانواده مهربانم

و تمامی سرورانی که معلم الفبای علم و زندگی ام بوده و راه خدا، تقوا و معرفت را نشانم دادند.

چکیده:

شارژپمپ‌ها مدارهای تبدیل ولتاژ dc-dc هستند که برای ایجاد ولتاژ بالاتر یا پایین‌تر از ولتاژ تغذیه، یا با قطبیت مخالف[1] ولتاژ تغذیه استفاده می‌شوند. و از خازن‌ها برای ذخیره انرژی استفاده می‌کنند. شارژپمپ‌ها در مدارهای مختلفی استفاده می‌شوند، مثل مدارهای ولتاژ پایین، مدارهای DRAM[2]، مدارات خازن متغیر[3]، مدارهای EEPROM، و ترانسیورها[4]. شارژپمپ‌ها در چیپ‌های نسل نانو[5] که در سیستم‌های مختلفی استفاده می‌شوند، نقش گسترده‌ای ایفا می‌کنند [۱و۲و۳].

این گزارش در مورد انواع شارژپمپ‌ها که برای ایجاد ولتاژ بالاتر استفاده می شوند و پارامترهای اساسی آنها توضیح می‌دهد. در نهایت در مورد بازده و ریپل ولتاژ شارژپمپ طراحی شده بحث می‌شود. ریپل ولتاژ پایین برای بسیاری از مدارها جزو پارامترهای مهم می‌باشد. اگر ریپل ولتاژ خروجی بسیار بزرگ باشد، عملکرد شارژپمپ که تامین توان می‌باشد، تنزل پیدا می‌کند.پارامتر مهم دیگر بازده می‌باشد. شارژپمپ با بازده پایین، توان زیادی را برای دستگاه‌های قابل حمل تلف می‌کند، که در این گزارش ریپل و بازده ولتاژ به ازای فرکانس ها، ولتاژهای ورودی و خازن بارهای متفاوت تحلیل و گزارش شده است. مزیت مدار طراحی شده ریپل کم(50mV)، بازده ولتاژ بالای آن (ولتاژ خروجی برابر با 7V) وجریان خروجی بزرگ(140V) می باشد(مقادیر عنوان شده به ازای ولتاژ تغذیه1.8V و فرکانس کاری 700kHz می باشند). ولتاژ و جریان بالاتر، توان خروجی بیشتر و ریپل کمتر، ناحیه کاری امن تری را برای بار ایجاد می کند.

[1] Opposite in polarity
[2] Dynamic random access memory
[3] Switched-capacitor
[4] transceivers
[5] Nanometer-generation chips

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول ۱

مقدمه ۱

۱-۱- اساس کار شارژپمپ ۲

فصل ۲ ..... ٦

معرفی انواع شارژ پمپ ها ٦

۲-۱- شارژپمپ دیکسون ٦

۲-۲- شارژپمپ استاتیک CTS ۸

۲-۳- شارژپمپ با تکنیک پیشرفته خازن متغیر ۱۰

۲-٤- شارژپمپ کسکود مجرد ۱۲

۲-۵- شارژپمپ کسکود دوبل ۱۳

فصل ۳ ..... ۱٦

پارامترهای اساسی ۱٦

۳-۱- ریپل ۱٦

۳-۲- تلفات ۱۷

۳-۳- بازده ۱۸

فصل ٤ ..... ۱۹

تکنیک های پیشرفته در طراحی شارژپمپ ۱۹

٤-۱- روش ترانزیستور عبوری ۱۹

٤-۲- روش کاهش جریان معکوس ۲۱

٤-۳- روش مینگ ۲۳

فصل ۵ ..... ۲٤
طراحی و شبیه سازی شارژپمپ با روش ترانزیستور عبوری و تکنیک بایاس بدنه ۲٤
۵-۱- دیود بدنه ۲٤
۵-۲- اساس کار مدار ۲۵
۵-۳- تکنیک بایاس بدنه ۲۷
۵-٤- عوامل مؤثر بر ولتاژ خروجی ۲۹
۵-۵- عوامل مؤثر بر ریپل ولتاژ خروجی ۳۲
۵-٦- شبیه سازی مدار با خازن غیر ایده آل ۳۵
فصل ٦ ..... ۳۸
نتیجه گیری و پیشنهاد ۳۸
منابع ٤۰

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل۱– ۱– مدار ساده شارژپمپ. ۲

شکل۱– ۲– مدار ساده شارژپمپ با بار خروجی. ۳

شکل۱– ۳– مدل ساده مدار کاکرافت والتون. ٤

شکل۱– ٤– مدار دقیق‌تر شارژپمپ کاکرافت والتون ۵ طبقه. ۵

شکل۲– ۱– مدار شارژ پمپ دیکسون. ٦

شکل۲– ۲– مدار معادل شارژپمپ دیکسون ۷

شکل۲– ۳– مدار شارژپمپ دیکسون با ترانزیستور نوع n ۸

شکل۲– ٤– تناوب ولتاژ ۸

شکل۲– ۵– مدار شارژپمپ CTS چهار طبقه ۹

شکل۲– ٦– نوسان ولتاژ در شارژپمپ پایه CTS. ۱۰

شکل۲– ۷– دوبل کننده ولتاژ مدرن. ۱۰

شکل۲– ۸– سلول شارژپمپ پایه ۱۱

شکل۲– ۹– شارژپمپ با دو خازن ۱۱

شکل۲– ۱۰– شارژپمپ کسکود مجرد ۱۳

شکل۲– ۱۱– شارژپمپ کسکود دوبل ۱٤

شکل۲– ۱۲– شارژپمپ نمونه با خازن های اضافه جهت تامین ولتاژ بایاس ترانزیستور بافر ۱٤

شکل ٤- ١- مدار شارژپمپ ٤ طبقه ٥ برابر کننده ولتاژ همراه با شکل موج ها ٢٠
شکل ٤- ٢- نمودار ولتاژ خروجی بر حسب ولتاژ تغذیه ٢٠
شکل ٤- ٣- مدار شارژپمپ با جریان معکوس کاهش یافته ٢١
شکل ٤- ٤- عملکرد شارژپمپ ٢٢
شکل ٤- ٥- اثر جریان بار بر ولتاژ خروجی ٢٢
شکل ٤- ٦- مدار شارژپمپ با ٤ طبقه پمپینگ ٢٣
شکل ٥- ١- اتصال های داخل ترانزیستور ٢٤
شکل ٥- ٢- کلاک های اعمال شده به مدار ٢٥
شکل ٥- ٣- پایه مدار طراحی شده ٢٦
شکل ٥- ٤- خروجی طبقه اول مدار ٢٦
شکل ٥- ٥- شارژ پمپ طراحی شده ٢٧
شکل ٥- ٦- خروجی مدار بدون استفاده از تکنیک بایاس ٢٨
شکل ٥- ٧- خروجی مدار با تکنیک بایاس با ولتاژ تغذیه 1.8V با فرکانس 700kHz و بار خروجی 3nF..... ٢٨
شکل ٥- ٨- خروجی مدار با تکنیک بایاس با ولتاژ تغذیه 1.8V با فرکانس 10MHz و بار خروجی 3nF. ٢٨
شکل ٥- ٩- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس تغییر ولتاژ تغذیه در فرکانس 700kHz و بار خروجی 3nF. ٢٩
شکل ٥- ١٠- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس تغییر فرکانس با ولتاژ تغذیه 1.8V و بار خروجی 3nF. ... ٣٠
شکل ٥- ١١- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس تغییرات خازن خروجی در فرکانس 700kHz و با ولتاژ تغذیه 1.8V. ٣١
شکل ٥- ١٢- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس تغییرات جریان در فرکانس 700kHz و با ولتاژ تغذیه 1.8V. ٣٢

شکل ۵- ۱۳- نمودار ریپل ولتاژ خروجی بر اساس تغییرات خازن خروجی در فرکانس 700kHz و با ولتاژ تغذیه 1.8V ۳۳

شکل ۵- ۱٤- رابطه فرکانس کلاک با ریپل ولتاژ ۳۳

شکل ۵- ۱۵- تغییرات ریپل ولتاژ خروجی را بر اساس تغییر فرکانس با ولتاژ تغذیه 1.8V و بار خروجی 3nF .. ۳٤

شکل ۵- ۱٦- تغییرات ریپل ولتاژ خروجی بر اساس ولتاژ تغذیه در فرکانس 700kHz و با بار خروجی 3nF ۳٤

شکل ۵- ۱۷- نسبت ریپل ولتاژ خروجی به ولتاژ خروجی در فرکانس 700kHz و با بار خروجی 3nF..... ۳۵

شکل ۵- ۱۸- مدار معادل خازن غیر ایده آل ۳٦

شکل ۵- ۱۹- پاسخ مدار طراحی شده با اعمال خازن غیر ایده آل..... ۳۷

فصل اول

مقدمه

شارژپمپ‌ها اغلب برای ایجاد ولتاژ بالاتر از ولتاژ تغذیه استفاده می‌شوند. ولتاژ بالا برای برنامه‌ریزی حافظه‌های غیرفرار، بایاس چاه P-MOS[1]، کم کردن جریان نشتی، درایو کردن[2] محرک‌های الکترواستاتیک و سوییچ‌های آنالوگ در سیستم‌های خازن متغیر[3] کاربرد دارد [۲]. این منبع ولتاژ بالای داخلی باید یا در سیستم تولید شود یا بصورت آنچیپ[4]. مدارهای قدیمی شارژپمپ مصرف توان بالایی دارند و همچنین سطح زیادی را اشغال می‌کنند که جواب‌گوی نیاز امروز نیست. یک شارژپمپ آنچیپ راه حل بسیار خوبی برای این مشکل است [۳]

ساخت وسایل اطلاعاتی[5] شخصی، مانند دوربین‌های دیجیتال و پخش کننده‌های موسیقی[6]، اتفاق بزرگی در تکنولوژی حافظه‌های غیرفرار بود، مخصوصا برای فلش مموری‌ها به‌خاطر حجم بالا، مصرف توان کم و تحمل بالای آنها در برابر شوک ها و ارتعاشات مکانیکی. EEPROMها و فلش مموری‌ها بهترین مثال برای یک شارژپمپ کارآمد هستند. اگرچه ولتاژ تغذیه کم است، اما فلش مموری نیاز به ولتاژ بالا برای نوشتن و پاک کردن اطلاعات دارد، تقریبا به ۳۰ ولت هم می‌رسد. همچنین این ولتاژ باید به‌طور دقیق کنترل شود تا ولتاژ آستانه ناشی از ترانزیستورهای سلول‌های حافظه دچار مشکل نشوند.

یک مشکل مهم در سیستم‌ها، زیرسیستم‌ها[7] هستند که مستقیما با منبع تغذیه در ارتباط نیستند. در این حالت‌ها یا نمی‌توان مستقیما از منبع استفاده کرد یا کار منطقی نیست. همچنین کمبود فضا باعث محدودیت در تعداد باطری‌ها می‌شود. مبدل‌های ولتاژ یک گزینه مناسب برای ایجاد ولتاژ مورد نیاز هستند، مخصوصا شارژپمپ‌ها که دارای

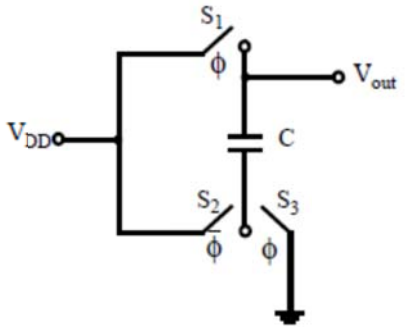
[1] P-MOS well
[2] driving
[3] Switched-capacitor systems
[4] On-chip
[5] Information devices
[6] MP3 players
[7] Subsystems

مزیت‌های سادگی، توان کم و قیمت پایین هستند. استفاده از شارژپمپ‌ها راحت می‌باشد، چون احتیاج به سلف‌های گران قیمت یا اجزای جداگانه ندارند. شارژپمپ‌ها تنها گزینه برای استفاده در دستگاه‌های مخابراتی[1] هستند، که باید از ولتاژ در دسترس 48V-، ولتاژ 5V+ تولید شود[۳و٤].

شایان ذکر است که علاوه بر شارژپمپ‌ها رگولاتورهای متغیر[2]، سلف‌ها[3] و ترانسفورمرها[4] نیز جزو ذخیره‌کننده‌های انرژی به شمار می‌آیند که به دلایلی که در پاراگراف قبل توضیح داده شد، اسستفاده از شارژپمپ‌ها رایج‌تر می‌باشد.

۱-۱- اساس کار شارژپمپ

در این گزارش در مورد شارژ پمپ‌هایی بحث می‌شود که ولتاژی بزرگتر از ولتاژ تغذیه ایجاد می‌کنند. برای توضیح این حالت به مدار زیر که شامل یک خازن ساده و سه سوییچ است اشاره می‌شود.



شکل ۱- ۱- مدار ساده شارژپمپ[۲].

در طول فاز کلاک Φ سوییچ ۱ و۳ بسته هستند و خازن تا ولتاژ تغذیه شارژ می‌شود. سپس سوییچ ۲ بسته می‌شود و صفحه پایینی خازن دارای ولتاژ تغذیه می‌شود و خازن ولتاژ تغذیه قبلی خود را هم نگه می‌دارد. در نتیجه در طول $\overline{\Phi}$ [۲]:

[1] Telecom applications
[2] Switching Regulators
[3] Inductors
[4] Transformers

$$(V_{out} - V_{DD}).C = C.V_{DD} \qquad (۱-۱)$$

در نتیجه در غیاب بارDC ولتاژی دو برابر ولتاژ تغذیه به‌دست می‌آید[۲].

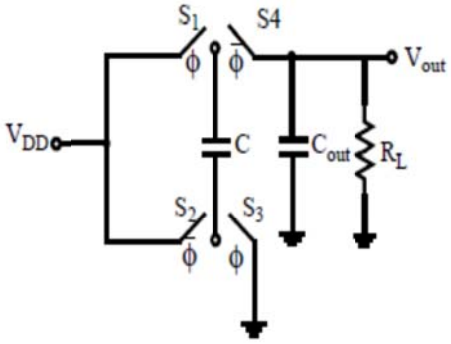
$$V_{out} = 2.V_{DD} \qquad (۱-۲)$$

برای قراردادن بار خروجی مدار باید به شکل ۱-۲ بسته شود.

در نتیجه[۲]:

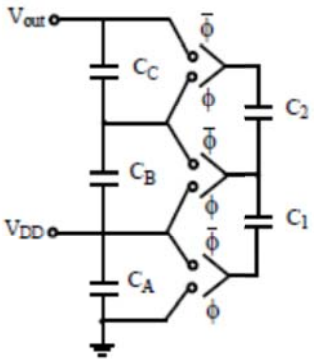
$$V_{out} = 2\frac{c}{c + c_{out}}V_{DD} \qquad (۱-۳)$$

با قرار دادن مقاومت بار ولتاژ ریپل در خروجی بوجود می‌آید که با به اندازه کافی بزرگ قراردادن خازن خروجی، قابل اغماض می‌گردد.



شکل۱- ۲- مدار ساده شارژپمپ با بار خروجی[۲].

برای زیاد کردن ولتاژ بیشتر از دو برابر می‌توان از کسکید کردن بیشتر از دو خازن بصورت سری بهره جست.این روش بوسیله کاکرافت و والتون پیشنهاد شد[۲] و برای ایجاد پتانسیل ثابت نزدیک 800,000V.

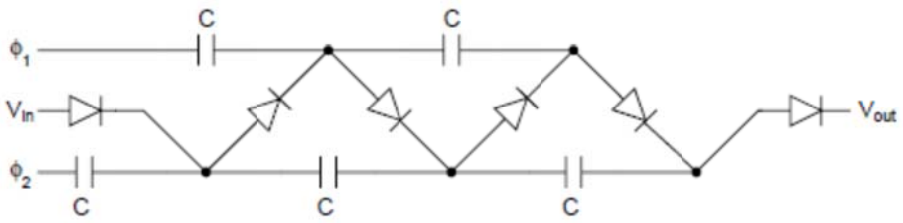


شکل ۱- ۳- مدل ساده مدار کاکرافت والتون[۲].

سه خازن A, B, C بصورت سری بهم وصل شده اند با ظرفیت C و خازن A به V_{DD}[1] هم وصل شده است. در فاز Φ، C_1 به C_A وصل شده و تا ولتاژ V_{DD} شارژ می شود. وقتی سوییچ تغییر حالت می‌دهد در طول سیکل $\overline{\Phi}$ خازن یک شارژ خود را به خازن B تقسیم کرده و شارژ هردو $\frac{V_{DD}}{2}$ می‌شود. البته در صورتی که ظرفیت یکسان داشته باشند.در سیکل بعد خازن دو و B پتانسیل $\frac{V_{DD}}{4}$ را به اشتراک می گذارند. در حالی که خازن یک مجدد تا ولتاژ V_{DD} شارژ می‌شود. این عملکرد ادامه می یابد و شارژ بین خازن‌ها تقسیم می‌شود تا V_{out} به پتانسیل $3V_{DD}$ برسد [۲].

مدار دقیق‌تر شارژپمپ کاکرافت والتون در شکل ۱-٤ نشان داده شده است، که از دیود و خازن های پشت سر هم استفاده می کند، تا ولتاژ را چند برابر کند. این مدار در صورتی عملکرد مناسب دارد که خازن‌های کوپلینگ[2] بسیار بزرگتر از خازن‌های استری[3] باشند.

[1] Positive Supply Power
[2] Coupling
[3] Stray



شکل۱- ٤- مدار دقیق‌تر شارژپمپ کاکرافت والتون ۵ طبقه[۳].

با اضافه کردن خازن‌ها به هر ضریبی از V_{DD} می توان دست یافت. اگرچه در عمل ضرب کننده کاکرافت–والتون، به علت ظرفیت سرگردان آن‌چیپ در فرم مجتمع ناکارآمد می شود. به علاوه امپدانس خروجی ضرب کننده به نسبت طبقه‌های ضرب کننده به سرعت افزایش می‌یابد[۲و۳].

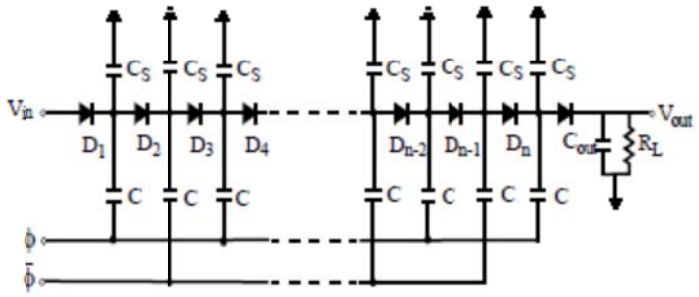
در این گزارش پس از معرفی انواع شارژپمپ که در فصل دوم معرفی شده اند، فصل سوم به معرفی و توضیح پارامترهای اساسی شارژپمپ(ریپل، تلفات و بازده) می پردازد. در فصل چهارم، سه تکنیک پیشرفته برای طراحی شارژپمپ معرفی شده و در فصل پنجم یک روش برای طراحی و بهینه سازی شارژپمپ پیشنهاد شده است.

فصل ۲

معرفی انواع شارژ پمپ‌ها

۲-۱- شارژپمپ دیکسون[1]

برای غلبه بر محدودیت‌های ناشی از شارژپمپ کاکرافت-والتون، یک مدار ضرب کننده ولتاژ جدید توسط دیکسون اختراع شد که برای فرم‌های یکپارچه[2] مناسب است[۲]. مزیت این مدار بر فرم کاکرافت-والتون این است که حتی در حضور خازن‌های استری ضرب کنندگی بهتری دارد و توانایی درایو کردن این فرم مستقل از تعداد مراحل ضرب کنندگی است. امروزه بسیاری از شارژ پمپ‌های CMOS بر این اساس کار می‌کنند . البته این شارژپمپ برای مدارات ولتاژ پایین اصلاً مناسب نیست.



شکل۲- ۱- مدار شارژ پمپ دیکسون[۲].

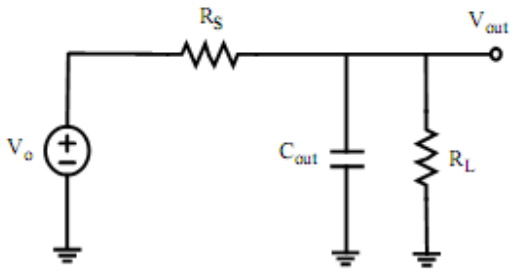
این ضرب‌کننده بر اساس پمپ کردن شارژ در طول زنجیره دیودها کار می‌کند که خازن‌ها بصورت پشت سرهم در هر کلاک شارژ و دشارژ می‌شوند. وقتی Φ صفر می‌شود، دیود D_1 هدایت می‌کند تا ولتاژ گره یک $V_{in}-V_d$ شود. زمانی که Φ یک شد، ولتاژ گره یک مقدار $V_{in}+(V_\Phi-V_d)$ را به خود می‌گیرد. این امر باعث می‌شود دیود

[1] Dickson charge pump
[2] Monolithic

D_2 هدایت کند، تا زمانیکه ولتاژ گره دو برابر با $V_{in}+(V_\Phi-V_d)-V_d$ شود. وقتی دوباره Φ صفر شد، ولتاژ گره دو می‌شود $V_{in}+2.(V_\Phi-V_d)$. پس از N مرحله مشاهده می‌شود که ولتاژ خروجی برابر است با[۳]

$$V_{out}=V_{in}+N.(V_\Phi-V_d)-V_d \qquad (۱-۲)$$

مدار معادل شارژپمپ دیکسون در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل۲- ۲- مدار معادل شارژپمپ دیکسون[۳].

باید توجه شود در خروجی با بار R_L ، ریپل V_R نیز وجود دارد[۳].

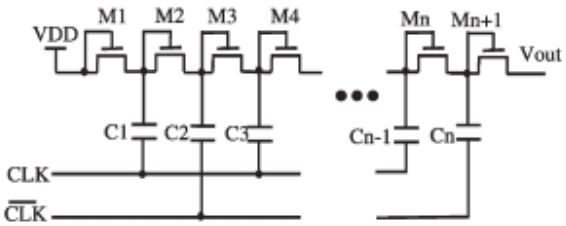
$$V_R=\frac{I_{out}}{f_{osc}.C_{out}}=\frac{V_{out}}{f_{osc}.R_L.C_{out}} \qquad (۲-۲)$$

این ریپل با افزایش فرکانس کلاک یا استفاده از خازن خروجی بزرگ می‌تواند کم شود.

همان‌طور که در شکل ۲-۳ ملاحظه می‌شود، ترانزیستور نوع n می‌توانند جانشین دیودهای شارژپمپ دیکسون شوند، که در نتیجه آن عملکرد مؤثرتری حاصل می گردد. اما در هر صورت این عملکرد بدلیل افت ولتاژ ترشولد[۱] ترانزیستورهای نوع n و پدیده تقسیم شارژ معکوس[۲] محدود می‌شود. همچنین برای ولتاژ خروجی بالا، بدلیل اثر

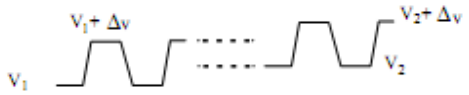
[1] Threshold
[2] Reverse charge-sharing phenomenon

بدنه[1]، بهره شارژپمپ کاهش می‌یابد. برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، مدار شارژپمپ شکل ۲-۳ طراحی شد [۲و۵].



شکل۲- ۳- مدار شارژپمپ دیکسون با ترانزیستور نوع n [۵].

در این شارژپمپ نوسان ولتاژ در هر گره، در هر سیکل به اندازه ΔV اتفاق می‌افتد. این قضیه برای شارژپمپ دیکسون ٤ طبقه در شکل ۲-٤ نشان داده شده است [۳].



شکل۲- ٤- تناوب ولتاژ [۳].

بهره ولتاژ پمپ شده از فرمول ۲-۳ به‌دست می‌آید[۳]

$$G_V = \Delta V - V_{tn} \qquad (۳-۲)$$

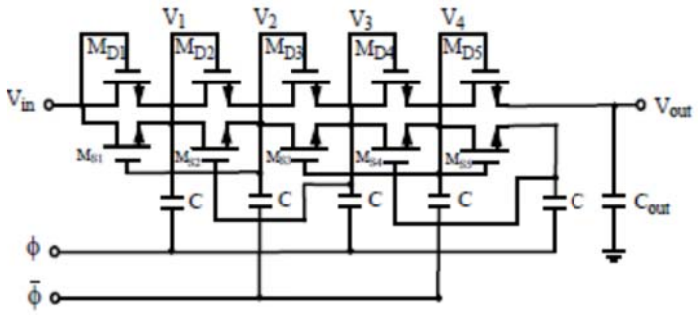
که V_{tn} ولتاژ ترشولد ترانزیستور می‌باشد.

۲-۲- شارژپمپ استاتیک CTS[2]

نوع جدیدی از شارژپمپ می‌باشد که از سوییچ‌های دینامیک برای افزایش بهره ولتاژ استفاده می‌کند. ایده اصلی پشت این ضرب کننده‌ها استفاده از سوییچ‌های دقیق MOS برای هدایت جریان شارژ در طول عمل پمپ کردن می‌باشد. این

[1] Body effect
[2] Static Charge Transfer Switches(CTS) charge pump

حالت نسبت به استفاده از دیود یا دیودهای متصل به ترانزیستور که منجر به افت ولتاژ مستقیم در هر گره[1] می‌شود مناسب‌تر است.



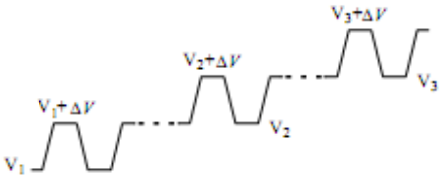
شکل۲- ۵- مدار شارژپمپ **CTS** چهار طبقه[۲]

عملکرد این شارژپمپ مشابه عملکرد نوع دیکسون می‌باشد و همان ولتاژهای اولیه در هر گره اصلی ایجاد می‌شود. روش کار این شارژپمپ براساس ایجاد ولتاژ بالا در گره‌های مختلف جهت کنترل CTS مرحله قبل می‌باشد. این زمانی کار می‌کند که سوییچ بتواند در زمان‌های تعیین شده روشن و خاموش شود. پس شارژ تنها در یک مسیر هدایت می‌شود، همانطور که در شکل ۲-٦ مشاهده می‌شود بالاترین ولتاژ ورودی هر گره برابر پایین‌ترین ولتاژخروجی است. بهره ولتاژ پمپ شده از فرمول ۲-٤ به‌دست می‌آید[۳]

$$G_V = V_2 - V_1 \qquad (٤-٢)$$

در مقایسه با شارژپمپ دیکسون، عملکرد این مدار بهتر می‌باشد.

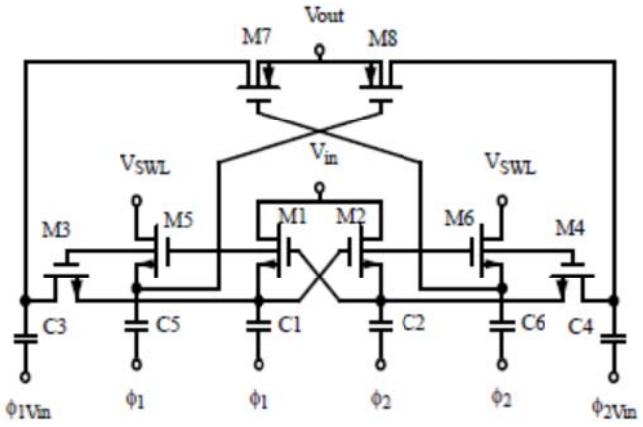
[1] node



شکل۲- ٦- نوسان ولتاژ در شارژپمپ پایه **CTS** [۳].

۲-۳- شارژپمپ با تکنیک پیشرفته خازن متغیر[1]

کلاس دیگر شارژپمپ که برای عملکرد بهینه و ولتاژ پایین مناسب است بر پایه تکنیک خازن متغیر می‌باشد. مقاله [٦] یک دوبرابر کننده ولتاژ را تشریح می‌کند. این مدار ساده و با بازده بالا می‌باشد. شکل ۲-٦ این مدار را نشان می‌دهد.



شکل۲- ۷- دوبل کننده ولتاژ مدرن [۳].

برای توضیح عملکرد مدار شکل ۲-۷ بهتر است به سلول شارژپمپ پایه که در شکل ۲-۸ نشان داده می‌شود توجه کرد.

[1] Switched-capacitor technique